

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

3MICT

CONTENTS

Слово пам'яті про Олександра Вікторовича Дегтярева 3	The Memorial Word about Olexander V. Degtyarev	3
Космічні матеріали і технології	Space Materials and Technologies	
<i>Кондратьєв А. В.</i> Концепція оптимізації конструк- тивно-технологічних параметрів композитних агре- гатів ракетно-космічної техніки з урахуванням осо- бливостей їхнього виробництва 5	<i>Kondratiev A. V.</i> A concept of optimization of structural and technological parameters of polymer composite rocket units considering the character of their produc- tion	5
Поштаренко Ю. А., Рассамакін Б. М., Сидорен- ко Ю. М., Хомініч В. І., Шевченко М. Д. Дослідниць- ко-випробувальний експериментальний термова- куумний стенд ТВК-2,5	Poshtarenko Yu. A., Rassamakin B. M., Sydorenko Yu. M., Khominich V. I., Shevchenko M. D. Research and testing experimental thermal vacuum stand TVK-2,5	23
Дослідження Землі з космосу	Study of the Earth from Space	
Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Яйлимова Г. О., Біло- конська Ю. В., Нів'євський О. В. Супутниковий моні- торинг посівів по Україні	Shelestov A., Yailymov B., Yailymova H., Bilokonska Y., Nivievskyi O. Satellite crop monitoring for Ukraine	27
Космічна й атмосферна фізика	Space and Atmospheric Physics	
Федоренко Ю. П. Залежність просторового періоду рухомих іоносферних збурень від їхньої відносної амплітуди	<i>Fedorenko Yu. P.</i> Dependence of spatial periods of traveling ionospheric disturbances on their relative amplitudes.	38

Данилевський В. О. Кутові характеристики розсію- вання сонячного світла земною атмосферою, спо- стережувані приладом «СканПол» проєкту «Аеро- золь-UA»	60	<i>Danylevsky V. O.</i> Angular properties of the solar light scattering in the terrestrial atmosphere observed by the Scan-Pol instrument of the AEROSOL-UA project	60
Космічна геоінформатика та геодезія		Space Geoinformatics and Geodesy	
Федонюк Т. П., Галущенко О. М., Мельничук Т. В., Жу- ков О. В., Вишневський Д. О., Зимаросва А. А., Гуре- ля В. В. Перспективи та основні аспекти застосуван- ня ГІС-технологій для моніторингу біологічного різноманіття (на прикладі Чорнобильського радіа- ційно-екологічного біосферного заповідника)	75	Fedonyuk T. P., Galushchenko O. M., Melnichuk T. V., Zhukov O. V., Vishnevskiy D. O., Zymaroieva A. A., Hure- lia V. V. Prospects and main aspects of the GIS-technol- ogies application for monitoring of biodiversity (on the example of the Chornobyl radiation-ecological biosphere reserve)	75
Вавилова І. Б., Зевако В. С., Пакуляк Л. К., Потапо- вич Л. П. Журнал «космічна наука і технологія»: ста- тистика і наукометрія за 1995—2020 роки	94	<i>Vavilova I. B., Zievako V. S., Pakuliak L. K., Potapo-</i> <i>vych L. P.</i> "Space Science and Technology" journal: Sta- tisticsandScientometricsfor1995—2020years	94
Авторський покажчик 2019 р	104	Index 2019	104
Авторський покажчик 2020 р.	107	Index 2020	107

На першій сторінці обкладинки — Цифрова модель рельєфу території Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника (див. статтю Федонюк Т. П. та ін., С. 75—93)

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, технічних, біологічних, геологічних та юридичних наук

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. Перереєстровано Міністерством юстиції України 21.11.2018 р., Свідоцтво серія КВ № 23700-13540 ПР

Підписано до друку 16.12.2020. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 11,55. Обл.-вид. арк. 12,13. Тираж 101 прим. Зам. № 6195.

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.



Вітчизняну та світову космічну й наукову спільноту спіткала тяжка втрата — 24 листопада пішов з життя видатний конструктор, академік НАН України, Генеральний директор — Генеральний конструктор Державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» Олександр Вікторович ДЕГТЯРЕВ.

Олександр Вікторович мав великий авторитет серед вітчизняних та зарубіжних фахівців ракетно-космічної техніки, вчених, керівників світових космічних агентств. Його добре знали у США, країнах Європейського Союзу, Китаї, Індії, Японії, Республіці Корея та в інших країнах світу. Завдяки його величезному досвіду, активній позиції, наполегливості і волі до дій багато міжнародних космічних проектів за участю України стали реальністю. Він послідовний прихильник розвитку міжнародної кооперації розробників ракетно-космічної техніки і зміцнення плідних зв'язків з міжнародною космічною спільнотою. За час роботи на посту Генерального директора — Генерального конструктора КБ «Південне» Олександр Вікторович Дегтярев робив усе для збереження, розбудови та розвитку вітчизняних підприємств, усе, щоб український космос посідав гідне місце серед провідних космічних держав світу.

Олександр Вікторович був талановитим організатором, блискучим професіоналом, взірцем самовідданого і чесного служіння Вітчизні. Поєднання особистих і професійних якостей, життєвого досвіду, відповідальність, компетентність та вміння організувати результативну командну роботу були відмінними рисами О. В. Дегтярева.

Спадщина Олександра Вікторовича Дегтярева ще довго залишатиметься основою майбутнього українського космосу. Справа, якій Олександр Вікторович віддав майже півстоліття, буде жити!

О. В. Дегтярев працював у КБ «Південне» з 1975 року: інженером, старшим інженером, провідним інженером, начальником групи, начальником служби маркетингу і комерційної діяльності, заступником Генерального конструктора — Генерального директора з зовнішньоекономічної діяльності, першим заступником Генерального конструктора — Генерального директора з системного проектування та комплексного розвитку підприємства. З 2010 року — Генеральний директор — Генеральний конструктор «Конструкторського бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля».

Він пройшов школу проектування, конструювання, відпрацювання та експлуатації ракетних комплексів стратегічного та космічного призначення. Зробив вагомий внесок у розроблення та модернізацію бойових ракетних комплексів, у проекти з комерційного використання космічних ракетних комплексів сімейства «Зеніт», «Дніпро», створення ряду космічних апаратів і супутникових систем, у реалізацію відомих ракетно-космічних проектів в міжнародній кооперації — «Морський старт», «Наземний старт», «Дніпро», «Антарес», «Вега».

За його активної участі українські підприємства і наукові організації об'єднано в єдину кооперацію та створено асоціацію високотехнологічних підприємств «Космос», налагоджено міцні контакти з багатьма світовими компаніями космічного профілю, космічними агентствами багатьох країн і організаціями Європи, США, Китаю, Єгипту, Японії, Республіки Корея та інших країн світу.

Автор близько 200 наукових публікацій, статей та ряду монографій, більш ніж 50 винаходів і патентів, які покладено в основу технології створення конкурентоспроможних ракетнокосмічних комплексів.

Він приділяв багато уваги розвитку галузевої науки і зміцненню науково-виробничих зв'язків ДКБ «Південне» з Національною академією наук України, академічними інститутами, вищими навчальними закладами багатьох регіонів України. Нам особливо приємно відзначити особливу увагу Олександра Вікторовича до співпраці ДКБ «Південне» ім. М. К. Янгеля» з Головною астрономічною обсерваторією Національної академії наук України (проєкт «Аерозоль-UA» та його активна підтримка видання журналу «Космічна наука і технологія»).

Академік Національної академії наук України, кандидат економічних наук, доктор технічних наук, академік Міжнародної академії астронавтики і Міжнародної інженерної академії, віцепрезидент Міжнародної астронавтичної федерації, секретар Українського регіонального відділення Міжнародної академії астронавтики.

Олександр Вікторович мав звання «Почесний працівник космічної галузі України», «Заслужений машинобудівник України», «Заслужений діяч науки і техніки України». Лауреат Державної премії України, лауреат «Золотої медалі В. Ф. Уткіна» та премії Кабінету Міністрів України, премії НАН України ім. академіка М. К. Янгеля. Нагороджений орденами «За заслуги» ІІІ та ІІ ступенів.

З превеликим сумом і болем ми, члени редколегії та редакції журналу «Космічна наука і технологія» зустріли звістку про смерть Олександра Вікторовича, світла пам'ять про якого назавжди залишиться в наших серцях.

Космічні матеріали та технології

Space Materials and Technologies

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.005 УДК 629.7.002.3:624.016(043)

А. В. КОНДРАТЬЄВ

зав. кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів, д-р техн. наук, проф. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8101-1961 E-mail: kondratyev_a_v@ukr.net, andrii.kondratiev@khame.edu.ua

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова вул. Маршала Бажанова 17, Харків, Україна, 61002

КОНЦЕПЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПОЗИТНИХ АГРЕГАТІВ РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ З УРАХУВАННЯМ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЇХНЬОГО ВИРОБНИЦТВА

Розроблено концепцію оптимізації та проєктний комплекс, який її реалізує шляхом вибору раціональних конструктивнотехнологічних параметрів агрегатів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів при різнорідному навантаженні з урахуванням сучасного рівня виробництва. Концепція включає п'ять взаємозв'язаних складових: проєктування, технологію виробництва, експлуатацію, екологію і безпеку виробничої життєдіяльності. На прикладі технологічної складової проблеми проведено аналіз можливих критеріальних оцінок оптимізації. Проведено декомпозицію загальної задачі оптимізації конструктивно-технологічних параметрів композитних агрегатів ракетно-космічної техніки на ряд типових, що відповідають основним типам конструкцій розглянутого класу техніки: несучі відсіки ракет-носіїв та прецизійні конструкції космічних апаратів. Запропоновано комплексний підхід до оптимального проєктування несучих відсіків головного блоку ракет-носіїв різних конструктивно-силових схем. Відмінною рисою підходу є можливість багатофакторної оптимізації параметрів агрегатів розглянутого класу при забезпеченні регламентованої несучої спроможності при одночасному силовому і тепловому навантаженні з урахуванням технологічних, експлуатаційних, економічних і екологічних обмежень, відповідних сучасному рівню їхнього виробництва. Запропоновано концептуальний підхід до синтезу раціональних параметрів композитних каркасів панелей сонячних батарей різних конструктивно-силових схем, заснований на комплексній реалізації відомих принципів, реалізованих відповідними блоками, які інтегровані засобами комп'ютерних технологій у комплекс оптимізації. Синтезовано комплексний підхід до створення прецизійних конструкцій космічного призначення з полімерних композиційних матеріалів, що забезпечує можливість отримання раціональних терморозміростабільних структур композиту. Розроблено і реалізовано алгоритм визначення раціональної структури пакету композиту, що забезпечує компромісне поєднання відповідно до запропонованих критеріїв абсолютних величин коефіцієнта лінійного температурного розширення для максимальної прецизійності виробу. Отримані результати дозволили забезпечити підвищення більш ніж на 20 % масової ефективності створених на провідних підприємствах галузі композитних агрегатів ракетно-космічної техніки.

Ключові слова: синтез параметрів, оптимізація, оптимальне проєктування, полімерні композиційні матеріали, ракетнокосмічна техніка, концепція, конструктивно-силові схеми, конструктивно-технологічні рішення.

Цитування: Кондратьєв А. В. Концепція оптимізації конструктивно-технологічних параметрів композитних агрегатів ракетно-космічної техніки з урахуванням особливостей їхнього виробництва. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 5—22. https://doi.org/10.15407/knit2020.06.005

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

вступ

Світовий ринок космічних послуг має стійку тенденцію по присутності на ньому обмеженого числа держав, куди входить і Україна, що володіють науково-технічним потенціалом створювати і розвивати ракетно-космічні технології [35, 36].

Сучасна ракетно-космічна техніка має низку особливостей, які виділяють її в окремий клас техніки [2]. Вона унікальна, бо призначена для реалізації конкретної науково-технічної програми, що не має аналогів. При цьому виробництво агрегатів ракетно-космічної техніки носить дрібносерійний або одиничний характер. Вироби винятково складні як для проєктування, так і у виробництві, мають високу вартість і повинні відповідати жорстким вимогам до надійності. Це ускладнює проведення аналізу якості виробу та його працездатності на стадії проєктування, оскільки немає можливості порівнювати його з аналогами.

Підвищення ефективності ракетно-космічної техніки значною мірою визначається конструкційними матеріалами, що використовуються [27]. Пошук шляхів вирішення цієї проблеми привів до тенденції використання в конструкціях ракетно-космічної техніки полімерних композиційних матеріалів [17, 20]. Обсяг і рівень відповідальності композитних виробів ракетно-космічної техніки постійно збільшується. Так в роботах [3, 12] відзначається, що частка застосування полімерних композиційних матеріалів у космічних апаратах становить 15...20%, а в ракетах-носіях — 30...90%.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Проєктування таких складних технічних систем, як композитні конструкції ракетно-космічної техніки, є складною багатоаспектною проблемою. Ця проблема пов'язана з тим, що полімерні композиційні матеріали створюються у процесі виготовлення виробу [31]. У свою чергу технологія виробництва цих виробів значною мірою пов'язана з іншими найважливішими складовими цієї комплексної проблеми. До цих складових належать економічна, екологічна, що включає і безпеку виробничої життєдіяльності експлуатації виробу (рис. 1) [4, 16].

Тому проєктний комплекс створення об'єктів даного класу техніки виростає у багатокритеріальну проблему, в якій повинні синтезуватися знання і результати досліджень багатьох фахівців вузького профілю [11].

Традиційно проблемні питання проєктування виробів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів є предметом технічної підготовки виробництва, а саме — конструкторської підготовки [3, 26]. Уперше проблему технічної підготовки виробництва композитних конструкцій літальних апаратів у двох її основних аспектах було сформульоване і значною мірою розв'язано у роботах співробітників Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» [6].

Технологічний аспект цієї проблеми був істотно розвинутий і розширений в роботах В. Ф. Забашти, узагальнених в його монографії [13]. Проблемі вибору раціональних конструктивно-технологічних рішень з'єднань композитних конструкцій літальних апаратів присвячено у праці Я. С. Карпова [14]. Проблема екологічної безпеки і безпеки виробничої життєдіяльності у процесах реалізації технології створення виробів аерокосмічної техніки з полімерних композиційних матеріалів досліджувалось у ряді робіт О. В. Гайдачука, узагальнених у докторській дисертації [5]. Розв'язанню проблеми підвищення ефективності створюваної в Україні ракетнокосмічної техніки з полімерних композиційних матеріалів шляхом розробки, вдосконалення і впровадження наукових основ технології виробництва її агрегатів регламентованої якості присвячено ряд робіт В. О. Коваленко [15].

Як показано в роботах [4, 7] обговорювана проблема включає п'ять взаємопов'язаних складових: проєктування, технологія виробництва, економіка, експлуатація, екологія і безпека виробничої життєдіяльності (рис. 1). З них найменш глибоко досліджено питання економіки і експлуатації композитних виробів аерокосмічної техніки. У цьому плані слід назвати роботу [10], у якій знайшли певне відображення аспек-



Рис. 1. Комплексна проблема створення ефективної ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів

ти економічної ефективності технології виробництва композитних конструкцій.

Що ж до експлуатабельності композитних конструкцій, то вирішенню цієї складової проблеми присвячено мало робіт, які освітлюють тільки її окремі аспекти [9]. Ще менше висвітлені досить важливі аспекти останнього етапу експлуатації літальних апаратів — утилізації [25].

Проте завершених комплексних досліджень, що об'єднують в науковому плані (теоретичному, експериментальному і організаційно-методологічному) єдиним концептуальним підходом усі складові обговорюваної проблеми до теперішнього часу немає. Мабуть, це пов'язано з двома головними причинами. Однією з них є необхідність для такого вирішення досить великого обсягу даних, які, судячи із згаданих вище джерел, поступово накопичуються. Другою причиною є прогнозована цими джерелами значна масштабність концепції оптимізації проєктних параметрів в цій багатокритеріальній проблемі реалізації проєктів створення конструкцій ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів, яка стає можливою тільки при сучасному рівні розвитку інформаційних комп'ютерних технологій і перспективних темпах їхнього росту.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Проведений цілеспрямований аналіз результатів, що містяться в цитованих вище дослідженнях і ряді інших джерел, дозволив накреслити контури концепції оптимізації конструктивнотехнологічних параметрів виробів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів. Її укрупнена блок-схема представлена на рис. 2.

Сутність концепції, що пропонується, полягає у:

• інтегрованій комп'ютеризації всього життєвого циклу проєктованого об'єкта, що включає одночасне вирішення завдань проєктування, технології виробництва, експлуатації, екології та безпеки виробничої життєдіяльності;



Рис. 2. Укрупнена блок-схема концепції оптимізації конструктивно-технологічних параметрів виробів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів

• науково обґрунтованому прогнозуванні максимального підвищення ефективності агрегатів ракетно-космічної техніки з урахуванням сучасного рівня їхнього виробництва;

 розкритті супутніх наявному рівню виробництва агрегатів ракетно-космічної техніки типових дефектів і встановленні їхньої потенційної небезпеки для штатного функціонування виробів у експлуатації.

Блок-схема включає усі п'ять складових оптимізації проєктних параметрів виробів ракетнокосмічної техніки з полімерних композиційних матеріалів. Кожна з них містить ряд взаємозв'язаних груп чинників різного рівня, для кожного з яких має місце один або декілька критеріїв, що визначають оптимальне значення чинників цієї групи.

Так, наприклад, з процесами, що характеризують технологію виробництва агрегатів ракетно-космічної техніки, пов'язаний ряд чинників різного рівня (рис. 3) [18].

Досить повну їхню класифікацію наведено в роботі [13]. На сьогодні розроблено ряд класифікацій типових технологічних процесів виробництва композитних виробів, проведені численні дослідження їхньої ефективності. На наш погляд, якнайповнішу класифікацію типових технологічних процесів запропоновано і обґрунтовано в роботі [1]; вона отримала подальший розвиток в ряді робіт [9, 18].



Рис. З. Приклад груп чинників різного рівня для технологічної складової запропонованої концепції оптимізації

Відповідно до неї з технологією пов'язано дві групи чинників різного рівня. Так, перша група чинників «Підготовчі технологічні процеси» включає в себе:

Ірівень — чинники, що визначають якість процесів (операцій) підготовки армувальних матеріалів як етапу реалізації технології виготовлення виробу з полімерних композиційних матеріалів на підготовчій стадії; чинники, що визначають якість процесів (операцій) підготовки сполучного як етапу реалізації технології і виготовлення виробу з полімерних композиційних матеріалів також на підготовчій стадії; чинники (операції) підготовки оснащення тієї ж підготовчої стадії виробництва виробу;

II рівень — чинники, що визначають якість конкретного процесу (операції) з групи процесів (операцій), що є чинниками І рівня підготовчої стадії.

Кількість чинників І рівня визначено першою групою «Підготовчі технологічні процеси»: X_i^{prep1}

(i = 1, 2, 3) — чинники I рівня першої групи. Наприклад, для першої групи чинників «Підготовчі технологічні процеси» X_1^{prep1} — підготовка армувального матеріалу, X_2^{prep1} — підготовка сполучного, X_3^{prep1} — підготовка оснащення. X_j^{prep2} (j = 1, 2, ..., k) — чинники II рівня першої

 X_j^{prep2} (j = 1, 2, ..., k) — чинники II рівня першої групи. Кількість чинників II рівня k визначається видом полімерних композиційних матеріалів (склопластик, вуглепластик, органопластик, гібридний композиційний матеріал або іншого виду і так далі), а також специфікою виробництва. Наприклад, X_1^{prep2} — підготовка армувального матеріалу розшліхтуванням, X_5^{prep2} — підготовка сполучного дозуванням, X_9^{prep2} — підготовка оснащення зачисткою і тому подібне.

Тут особою, що приймає рішення, є фахівець або керівник технологічної служби відповідного рівня.

При необхідності для першої групи чинників «Підготовчі технологічні процеси» може вводитися III рівень оптимізації: чинники, що визна-



Рис. 4. Проєктний комплекс реалізації оптимізації конструктивно-технологічних параметрів композитних виробів ракетно-космічної техніки

чають якість конкретної операції з групи процесів операцій, що є чинниками II рівня підготовчої стадії. Кількість чинників III рівня, якщо його введено, визначається аналогічно.

Аналогічно вводяться чинники для другої групи чинників «Основні технологічні процеси» X_i^{bas1} , X_i^{bas2} , X_r^{bas3} .

Критерії оптимальності різних груп чинників цієї групи і різних їхніх рівнів можуть бути різними і частково або повністю збігатися. Зокрема до таких критеріїв можна віднести: трудомісткість процесу або операції; собівартість процесу (операції), тривалість, енергоємність, екологічність (включаючи безпеку виробничої життєдіяльності процесу або операції), технологічність операції або процесу і так далі).

З метою максимального підвищення ефективності агрегатів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів з урахуванням наявного рівня їхнього виробництва був розроблений проєктний комплекс реалізації запропонованої концепції (рис. 4).

Початковим документом на проєктування виробу є Технічне завдання на створення агрегату, складене його замовником спільно з розробником. При складанні цього документу його авторами чітко формулюються мета і завдання, що вирішуються цим проєктом у глобальному аспекті (рис. 5).

Дані з Технічного завдання поступають безпосередньо в проєктний комплекс реалізації оптимізації конструктивно-технологічних параметрів, де вирішується задача обґрунтованого (з урахуванням вказаного критерію ефективності) вибору матеріалів для конструкцій ракетно-космічної техніки і взаємозв'язані з ними завдання синтезу конструктивно-силових схем агрегатів і конструктивно-технологічних рішень вузлів, деталей і з'єднань з урахуванням обмежень наявного рівня їхнього виробництва.

Як зазначалося вище, відмінною рисою запропонованої концепції є використання сучасних потужних інтегрованих програмних комплексів. Тому розкриття закономірностей роботи конструкції при виборі її конструктивно-силової схеми і визначення її раціональних параметрів проводиться як на основі наявних аналітичних моделей, так і за допомогою числових (дискретних) методів. В даний час особливо широко застосовується метод скінченних елементів. Висока точність і повнота картин напружено-деформованих станів, що отримуються при цьому,



Рис. 5. Основні складові Технічного завдання на створення виробів ракетно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів

допомагають ретельно проаналізувати особливості роботи основних елементів конструктивно-силової схеми і виявити потенційно небезпечні зони [34].

Як критерій оцінювання різних варіантів проєкту конструкції пропонується вибраний відповідно до технічного завдання показник ефективності агрегату ракетно-космічної техніки. Інші показники ефективності приймаються як обмеження, що накладаються на рішення оптимізаційної задачі. Облік додаткових функціональних обмежень у проєктному комплексі оптимізації параметрів композитних виробів зводиться до забезпечення конструктивно-технологічної здійснимості проєкту в умовах наявного рівня виробництва агрегатів цього класу.

Зважаючи на велику різноманітність агрегатів ракетно-космічної техніки і вимог, що висуваються до них, безпосереднє застосування розробленого проєктного комплексу оптимізації недоцільно. Це викликано тим, що його програмна реалізація в цьому випадку буде значно ускладненою. Тому потрібна декомпозиція загального завдання оптимального проєктування об'єктів ракетно-космічної техніки на ряд типових, що відповідають конкретному класу конструкцій.

Увесь комплекс проведених досліджень та їхніх основних результатів представлено у вигляді аналізу типових вітчизняних об'єктів ракетно-космічної техніки, реалізованих на ряді підприємств аерокосмічного профілю України (рис. 6) [8]:

 несучі відсіки ракет-носіїв — головні обтічники, адаптери, міжступеневі відсіки;

• прецизійні конструкції космічних апаратів — панелі сонячних батарей, розміростабільні платформи, корпуси супутників.

На рис. 7 представлено принципову блоксхему комплексного підходу інтегрального проєктування несучих відсіків головного блоку ракети-носія, що реалізується в рамках запропонованої концепції оптимізації.

Відмінною рисою підходу є можливість структурно-параметричного синтезу раціональних конструкцій даного класу техніки при забезпеченні регламентованої несучої спроможності при одночасному силовому і тепловому наван-



Рис. 6. Типові агрегати ракетно-космічної техніки, на оптимальне проєктування яких спрямовано комплекс досліджень



Рис. 7. Блок-схема комплексного підходу до оптимального проєктування несучих відсіків ракет-носіїв при одночасному тепловому і силовому навантаженні з урахуванням наявного рівня їхнього виробництва

таженні з урахуванням технологічних, експлуатаційних, економічних і екологічних обмежень, що відповідають сучасному рівню їхнього виробництва [8, 23, 33]. Варійовані параметри даного класу конструкцій відрізняються для різних конструктивно-силових схем. Так, у конструкцій, які мають багатошарові несучі обшивки, до варійованих параметрів належать товщина і кути армування моношарів, що утворюють ці обшивки. Для сендвічевих агрегатів, окрім параметрів несучих обшивок, найважливішою конструктивною змінною є висота заповнювача. Для додаткового зниження маси стільникових конструкцій можуть варіюватися параметри стільникового заповнювача [30]. Нарешті, для сітчастих (ізогридних, анізогридних) конструкцій варійовані параметри — висота, ширина, кути нахилу і число ребер [38]. Для агрегатів на основі інтегральних стрингерних панелей — число ребер (чи крок їхнього розташування), а також параметри, що визначають розміри поперечного перерізу і структуру ребер.

До числа змінних проєктування можуть відноситися і тип конструктивно-силової схеми, а також вид конструкційного матеріалу. Проте організація оптимізації з такими варійованими параметрами дуже складна. Проте, як вказується у ряді робіт, наприклад [22, 24], набагато ефективніше провести серію оптимізаційних розрахунків з фіксованими значеннями цих параметрів і вибрати найкращий з отриманих результатів. Для скорочення просторів пошуку шляхом мінімізації числа варійованих параметрів або поділу їхньої оптимізації на етапи у запропонованій блок-схемі передбачено можливість попереднього аналізу значущості параметрів кожної конструктивно-силової схеми. Нарівні зі зменшенням розмірності простору пошуку можна також проводити аналіз ефективності армування несучих обшивок за рахунок можливості зменшення числа типів різних моношарів. Подібний підхід викладено, наприклад, в роботі [29], де наведено приклади числового вирішення задач оптимізації для однорідних і неоднорідних за товщиною композитних оболонок.

У рамках запропонованого підходу до змінних проєктування можуть також належати параме-

три додаткового силового набору, коли разом з основною конструктивно-силовою схемою є невелика кількість потужних подовжніх і (чи) поперечних елементів [23, 29, 30]. У багатьох випадках характеристики додаткового силового набору задаються заздалегідь і не можуть бути змінені на етапі вибору параметрів несучих відсіків. Проте можливість вирішення задачі їхнього одночасного оптимального проєктування дозволяє істотно підвищити ефективність агрегатів даного класу.

У рамках запропонованого підходу передбачена можливість оцінки впливу на раціональні параметри агрегату характерних для його виробництва технологічних відхилень в межах регламентованих допусків на них, визначених Технічним завданням. Система нормування полів допусків на можливі відхилення конструкцій даного класу, що виникають у процесі виробництва, а також конкретний алгоритм обліку їхнього впливу надходять у блок попереднього аналізу оптимальності конструктивно-силових схем і безпосередньо в оптимізаційний блок [23, 29, 30, 33].

Як вже відзначалося вище, раціоналізація постановки задачі оптимального проєктування при інтенсивному тепловому навантаженні несучих відсіків головного блоку ракети-носія, особливо головних обтічників, передбачає необхідність одночасної оптимізації параметрів їхніх конструктивно-силових схем і теплозахисного покриття. За варійовані параметри у рамках запропонованого підходу використовуються товщина теплозахисного покриття в різних зонах конструкції, а також його параметри.

Температурний вплив на агрегати даного класу викликає у конструкційних матеріалах також нелінійні фізико-хімічні явища, які часто призводять до зниження фізико-механічних характеристик полімерних композиційних матеріалів. Оцінювання такого впливу у рамках запропонованого підходу здійснюється у відповідному блоці на основі відомих методик [21].

Усі змінні проєктування поетапно поступають в оптимізаційний блок, де вирішується задача вибору раціонального співвідношення необхідної товщини теплозахисту, конструктивних параметрів конструктивно-силової схеми і додаткового



Рис. 8. Несучі композитні відсіки ракети-носія «Циклон-4», стосовно до яких було реалізовано запропонований комплексний підхід до оптимального проєктування

силового набору при одночасному забезпеченні допустимих діапазонів температур зовнішньої і внутрішньої поверхонь даного агрегату, несучої спроможності його раціонального варіанту в усіх критичних зонах з урахуванням погіршень фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів від теплової дії та виконанні додаткових функціональних обмежень, пов'язаних з технологічними, економічними, екологічними та іншими чинниками [23, 29, 30, 33].

Після визначення раціональних параметрів конструкції отримані дані поступають у повірочний блок оптимізації, де можуть провадитися всілякі розрахунки. Необхідність наявності цього блоку є обов'язковою умовою і викликана тим фактом, що технічно неможливо реалізувати оптимізацію параметрів об'єкту, представленого в усіх тонкощах його параметрів.

На прикладі несучих відсіків головного блоку вітчизняної ракети-носія «Циклон-4» розробки державного підприємства «Конструкторське бюро «Південне» показано реалізацію запропонованого підходу до синтезу їхніх раціональних конструктивно-технологічних параметрів (рис. 8) [8, 23, 29, 30, 33].

Реалізація запропонованого підходу при мінімізації маси сендвічевої конструктивно-силової схеми головного обтічника ракети-носія «Циклон-4» при одночасному тепловому та силовому навантаженнях дозволила визначити раціональне співвідношення товщини теплозахисту, несучих обшивок, висоти стільникового заповнювача і параметрів його чарунки в кожному з відсіків. Так, результатом першого етапу оптимізації параметрів головного обтічника стало зменшення його маси порівняно з базовим варіантом на 16 % (53.3 кг), а заключного — додаткове зменшення маси обтічника порівняно з варіантом, в якому стільники мали чарунку правильної шестигранної форми, — на 5.6 % (15.7 кг), а порівняно з базовим варіантом — на 21 % (69 кг) [8, 23, 29, 30, 33].



Рис. 9. Комплексна реалізація принципів концептуального підходу до синтезу раціональних параметрів панелей сонячних батарей космічного призначення

На рис. 9 показана комплексна реалізація в рамках запропонованої концепції оптимізації принципів концептуального підходу до синтезу раціональних параметрів панелей сонячних батарей космічного призначення.

Запропонований підхід грунтується на комплексній реалізації відомих принципів, основаних на досвіді проєктування і створення конструкцій даного класу [37]. Кожен з поданих принципів реалізовано відповідними блоками, інтегрованими за допомогою засобів комп'ютерних технологій у комплекс оптимізації конструктивно-технологічних параметрів панелей сонячних батарей космічного призначення, який включає цільову функцію, що виражає поверхневу масу панелей залежно від варійованих і незмінних у процесі оптимізації параметрів (рис. 10).

Варійованими параметрами залежно від типу конструктивно-силової схеми можуть бути тов-

щина і схеми армування несучих обшивок, розміри поперечного перерізу і структура ребер, параметри заповнювачів тощо. Для вибору раціональної конструктивно-силової схеми, як і при розгляді несучих відсіків, використовується поліваріантна модель оптимізації [8, 22, 24]. Тобто, проводиться серія оптимізаційних розрахунків для фіксованих конструктивно-силових схем і вибирається найкращий з отриманих результатів.

При цьому не варійованими параметрами є: характер, вид і величина зовнішніх дій; геометричні розміри (габарити) панелі сонячної батареї і координати вузлів кріплення; поверхнева маса фотоперетворювачів; вживані матеріали та їхні фізико-механічні характеристики.

Реалізація з урахуванням викладених вище принципів запропонованого комплексу оптимізації панелей сонячних батарей космічного призначення у процесі їхнього проєктування і



Рис. 10. Принципова блок-схема реалізації концептуального підходу до синтезу раціональних параметрів панелей сонячних батарей космічного призначення



Рис. 11. Досліджувані конструктивно-силові схеми сегменту панелі концентраторної сонячної батареї для установки лінз Френеля: *a* — гофрована, *б* — фермова

виробництва дозволили синтезувати їхні раціональні параметри для різних конструктивно-силових схем з рівнем поверхневої маси, який відповідає світовим тенденціям (рис. 11) [32].

Для успішної реалізації міжнародних космічних програм із запуску в космос систем супутникового зв'язку і систем зондування потрібно створення прецизійних агрегатів нового покоління з підвищеними вимогами до їхньої якості, надійності і конкурентоспроможності. У усіх випадках основною вимогою, що визначає працездатність цього класу конструкцій, є збереження заданих розмірів і форми при дії різних чинників космічного простору, у першу чергу — температури. Відомо, що основною умовою проєктування оптимальних прецизійних конструкцій є визначення таких структурних параметрів композиту, які забезпечують рівність нулеві тих або інших складових вектора деформацій при температурних навантаженнях. Це зводиться до задачі керування коефіцієнтом лінійного температурного розширення полімерних композиційних матеріалів [28, 32]. Відповідно до такого підходу розроблено і реалізовано алгоритм визначення раціональної структури пакету композиту, що забезпечує компромісне поєднання абсолютних величин коефіцієнта лінійного температурного розширення для максимальної прецизійності виробів космічного призначення (рис. 12).



Рис. 12. Схема алгоритму визначення раціональної структури пакету, що забезпечує компромісне поєднання максимальної прецизійності

Результати оптимізації структури полімерного композиційного матеріалу за критеріями зведених коефіцієнтів лінійного температурного розширення ($K_{nr} = 0.5$)

Орієнтація Початкова товщина групи шарів ϕ_i групи шарів δ_i , мм в структурі пакету та їхня відносна товщина	Початкова товщина групи шарів б _і , мм	Раціональна товщина групи шарів δ _і , мм та їхня відносна товщина			
	за критерієм а _{red1}	за критерієм а _{red2}			
0°	1.5 (0.167)	0.9 (0.1)	0.9 (0.1)		
±45°	6 (0.666)	7.2 (0.8)	7.2 (0.8)		
90°	1.5 (0.167)	0.9 (0.1)	0.9 (0.1)		
α_x , 10 ⁻⁶ K ⁻¹	-1.4	-1.24	-1.24		
$\alpha_y, 10^{-6} \mathrm{K}^{-1}$	0.803	0.641	0.641		
$\alpha_{red}, 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	1.140	0.984	0.938		

За допомогою наближених критеріїв оптимізації структури полімерного композиційного матеріалу

$$\alpha_{red1} = |\alpha_x| \left(K_{pr} + \left| \frac{\alpha_y}{\alpha_x} \right| (1 - K_{pr}) \right) \rightarrow \min,$$

$$\alpha_{red2} = |\alpha_x| \sqrt{K_{pr}^2 + \left(\frac{\alpha_y}{\alpha_x} \right)^2 (1 - K_{pr})^2} \rightarrow \min,$$

де α_x , α_y — коефіцієнти лінійного температурного розширення структури полімерного композиційного матеріалу у матеріальній системі координат, K_{pr} — коефіцієнти пріоритетності, що визначаються умовами експлуатації конструкції ($0 \le K_{pr} \le 1$), синтезовано раціональні терморозміростабільні структури вуглепластику (таблиця).

Наведений приклад показав, що обидва критерії призводять як до однакової раціональної товщини груп шарів, так і до близьких значень α_{red1} і α_{red2} , що відрізняються на величину, яка не перевищує похибку проведених обчислень. Це свідчить про практичну рівнозначність цих критеріїв.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено концепцію оптимізації конструктивно-технологічних параметрів композитних виробів ракетно-космічної техніки, яка включає п'ять взаємозв'язаних складових: проєктування, технологію виробництва, експлуатацію, екологію і безпеку виробничої життєдіяльності. На прикладі технологічної складової проблеми проведено аналіз можливих критеріальних оцінок.

2. Синтезовано проєктний комплекс реалізації концепції оптимізації конструктивно-технологічних параметрів композитних виробів ракетно-космічної техніки, що дозволяє вирішити завдання обґрунтованого (з урахуванням вибраного критерію ефективності) вибору конструкційних матеріалів і взаємозв'язаних з ним завдання синтезу конструктивно-силової схеми агрегатів і конструктивно-технологічних рішень вузлів, деталей і з'єднань з урахуванням обмежень наявного рівня їхнього виробництва.

3. Запропоновано комплексний підхід до оптимального проєктування несучих відсіків

головного блоку ракети-носія різних конструктивно-силових схем. Відмінною рисою підходу є можливість багатофакторної оптимізації параметрів агрегатів даного класу при забезпеченні регламентованої несучої спроможності при одночасному силовому і тепловому навантаженні з урахуванням технологічних, експлуатаційних, економічних і екологічних обмежень, що відповідають наявному рівню їхнього виробництва, що несуть.

4. Запропоновано концептуальний підхід до синтезу раціональних параметрів композитних каркасів панелей сонячних батарей різних конструктивно-силових схем, оснований на комплексній реалізації принципів, реалізованих відповідними блоками, інтегровані засобами комп'ютерних технологій у комплекс оптимізації конструктивно-технологічних параметрів панелей сонячних батарей.

5. Розроблено і реалізовано алгоритм визначення раціональної структури пакету полімерного композиційного матеріалу, що забезпечує компромісне поєднання відповідно до запропонованих критеріїв абсолютних величин коефіцієнта лінійного температурного розширення для максимальної прецизійності виробу. Наведено приклади синтезу раціональних терморозміростабільних структур вуглепластику, які свідчать про практичну рівноцінність запропонованих критеріїв.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Бичков С. А., Гайдачук О. В., Гайдачук В. Є. *Технологія виробництва літальних апаратів із композиційних матеріалів*. Київ: ІСДО, 1995. 376 с.
- 2. Близниченко В. В., Джур Є. О., Краснікова Р. Д. *Проєктування і конструювання ракет-носіїв*. За ред. С. М. Конюхова. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2007. 504 с.
- Буланов И. М., Воробей В. В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. 516 с.
- 4. Бычков С. А., Гайдачук В. Е. Основные проблемы создания изделий авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов: аналитический обзор. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. 1998. Вып. 13. С. 6—17.
- 5. Гайдачук А. В. Научные основы безопасной технологии производства конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов: дисс. ... д-ра техн. наук. Харьков, 2002. 386 с. (Машинопись).
- 6. Гайдачук А. В., Гайдачук В. Е., Карпов Я. С. Роль ХАИ в решении проблемы научного обеспечения внедрения композиционных материалов в авиационно-космическую технику: итоги и перспективы. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2005. № 7. С. 21–39.
- 7. Гайдачук В. Є., Гайдачук О. В., Карпов Я. С. Тридцять років наукової школи з проблеми створення виробів авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 2(69). С. 12—19.
- 8. Гайдачук А. В., Гайдачук В. Е., Кондратьев А. В., Коваленко В. А., Кириченко В. В., Потапов А. М. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: монограф. в 2 т. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского ХАИ, 2016. Т. 2. Синтез параметров композитных агрегатов ракетно-космической техники при разнородном нагружении. 250 с.
- 9. Гайдачук В. Е., Коваленко В. А., Потапов А. В. Основные принципы и правила проектирования технологических процессов производства агрегатов ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов. *Технологические системы*. 2013. № 2(63). С. 29—39.
- 10. Гайдачук А. В., Чесноков А. В. Концепция оптимизации конструкций из композиционных материалов с учетом экономической эффективности. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 9. С. 93—98.
- 11. Дегтярев А. В. *Ракетная техника. Проблемы и перспективы.* Избранные научно-технические публикации. 2014. 420 с.
- 12. Дегтярев А. В., Коваленко В. А., Потапов А. В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2012. № 2(89). С. 34—38.
- 13. Забашта В. Ф. *Техническая подготовка производства конструкций из композиционных материалов*: монограф. Київ: Техніка, 1993. 147 с.

- 14. Карпов Я. С. *Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов*: монограф. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», 2006. 359 с.
- Коваленко В. А. Научные основы технологии производства агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов: дисс. ... д-ра техн. наук. Харьков, 2014. 414 с. (Машинопись).
- 16. Коваленко В. А., Московская Н. М., Сливинский В. И. Анализ и модификация математических моделей показателей качества и методов их определения применительно к изделиям ракетно-космической техники. Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. 2011. Вып. 4 (68). С. 7—22.
- 17. Кондратенко А. Н., Голубкова Т. А. Полимерные композиционные материалы в изделиях зарубежной ракетно-космической техники. (Обзор). Конструкции из композиционных материалов. 2009. № 2. С. 24—35.
- 18. Кондратьев А. В. Концепция оптимального проектирования изделий авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов. *Системні технології*. 2011. Вып. 4 (75). С. 28—34.
- Лебедев И. К. Эксплуатационная долговечность элементов авиаконструкций из композиционных материалов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2011. 18 с.
- 20. Линник А. К., Красникова Р. Д., Липовский В. И., Баранов Е. Ю. Композиты в конструкциях корпусов ракет-носителей. Системный анализ проблем и перспектив разработки и применения: монограф. Днепр: ЛИРА, 2018. 260 с.
- 21. Михайлин Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. СПб.: НОТ, 2008. 822 с.
- 22. Немировский Ю. В., Янковский А. П. *Рациональное проектирование армированных конструкций*: монограф. Новосибирск: Наука, 2002. 488 с.
- 23. Потапов А. М., Коваленко В. А., Кондратьев А. В., Гайдачук В. Е. Научное сопровождение разработки композитных несущих отсеков головного блока ракет-носителей. *Космическая техника. Ракетное вооружение*. 2017. Вып. 2 (114). С. 112—120.
- 24. Смердов А. А. *Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники*: дисс. ... д-ра техн. наук. Москва, 2007. 410 с.
- 25. Сухов В. В., Зайпулаев М. В. Общие принципы оценки технико-экономической эффективности технологических процессов разделки авиационных конструкций. *Технологические системы*. 2000. № 2. С. 73 77.
- 26. *Тарасов В. А., Кашуба Л. А. Теоретические основы технологии ракетостроения*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 352 с.
- 27. Bychkov A. S., Kondratiev A. V. Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. *J. Superhard Materials*. 2019. **41**, No. 1. P. 53–59. https://doi.org/10.3103/S1063457619010088
- Gaidachuk V. E., Kondratiev A. V., Chesnokov A. V. Changes in the thermal and dimensional stability of the structure of a polymer composite after carbonization. *Mechanics of Composite Materials*. 2017. 52, No. 6. P. 799–806. https://doi. org/10.1007/s11029-017-9631-6
- 29. Kondratiev A. Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. 2019. **6**, No. 7 (102). P. 6–18. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551
- 30. Kondratiev A., Gaidachuk V. Weight-based optimization of sandwich shelled composite structures with a honeycomb filler. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. 2019. **1**, No. 1 (97). P. 24–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154928
- Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E., Kharchenko M. E. Relationships between the ultimate strengths of polymer composites in static bending, compression, and tension. *Mechanics of Composite Materials*. 2019. 55, No. 2. P. 259–266. https://doi. org/10.1007/s11029-019-09808-x
- Kondratiev A., Gaidachuk V., Nabokina T., Tsaritsynskyi A. New possibilities in creating of effective composite size-stable honeycomb structures designed for space purposes. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. *Adv. Intel. Syst. and Computing book ser. AISC* 1113. 2020. No. 5. P. 45–59. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5
- Kondratiev A. V., Kovalenko V. O. Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*. 2019. 25, No. 4 (119). P. 3–21. https://doi. org/10.15407/knit2019.04.003
- Mackerle J. Finite element analyses of sandwich structures: a bibliography (1980–2001). *Eng. Computations*. 2002. No. 19:2. P. 206–245. https://doi.org/10.2514/2.991
- Malysheva N. R., Hurova A. M. Legal forms of public-private partnership for the space activity of Ukraine and its distinction from related forms of contractual cooperation. *Space Science and Technology*. 2019. 25, No. 1. P. 73–84. https://doi. org/10.15407/knit2019.01.073
- Milinevsky G., Yatskiv Y., Degtyaryov O., Syniavskyi I., Mishchenko M., Rosenbush V. New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*. 2016. No. 123. P. 292–300. https://doi. org/10.1016/j.actaastro.2016.02.027

- 37. Slyvyns'kyy V., Gajdachuk V., Gajdachuk A., Slyvyns'ka N. Weight optimization of honeycomb structures for space applications [Электронный ресурс]. 56th International Astronautical Congress 2005 Japan, Fukuoka IAC-05-C2.3.07. Р. 1 10. 1 электрон. опт. Диск
- Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. Anisogrid composite lattice structures Development and aerospace applications. *Composite Structures*. 2012. No. 94. P. 1117–1127.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2020

REFERENCES

- 1. Bichkov S. A., Gajdachuk O. V., Gajdachuk V. E. (1995). *Manufacturing technology of aircraft from composite materials*. Kiïv, ISDO Publ. [In Ukrainian].
- 2. Blyznychenko V. V., Dzhur Ye. O., Krasnikova R. D. (2007). *Design and construction of rockets* (ed. red. S. M. Konyukhov). Dnipropetrovs'k, DNU Publ. [In Ukrainian].
- 3. Bulanov I. M., Vorobej V. V. (1998). Technology of rocket and aerospace structures from composite materials. Moscow: MGTU im. N. Je. Baumana Publ. [In Russian].
- 4. Bychkov S. A., Gajdachuk V. E. (1998). The main problems of creating products of aviation and rocket and space technology from polymer composite materials: an analytical review. *Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsii letatel'nykh apparatov*, **13**, 6–17. [In Russian].
- 5. Gajdachuk A. V. (2002). Scientific basis of safe technology for the production of aircraft structures from polymer composite materials: Diss. ... d-ra tekhn. nauk. Kharkiv [In Russian].
- Gajdachuk A. V., Gajdachuk V. E., Karpov Ja. S. (2005). The role of KhAI in solving the problem of scientific support for the implementation of composite materials in aerospace technology: results and prospects. *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i* tehnologija, No. 7, 21–39. [In Russian].
- Gaydachuk V. E., Gaydachuk O. V., Karpov Ya. S. (2010). Thirty years of scientific school on the problem of creation of aerospace engineering products from polymer composite materials. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 2(69), 12–19 [In Ukrainian].
- 8. Gajdachuk A. V., Gajdachuk V. E., Kondratiev A. V., Kovalenko V. A., Kirichenko V. V., Potapov A. M. (2016). *Methodology for the development of effective structural and technological solutions for composite units of rocket and space technology*. Kharkiv, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute Publ. Vol. 2. [In Russian].
- Gajdachuk V. E., Kovalenko V. A., Potapov A. V. (2013). Basic principles and rules for the design of technological processes for the production of rocket and space technology units from polymer composite materials. *Tehnologicheskie sistemy*, No. 2(63), 29–39 [In Russian].
- Gajdachuk A. V., Chesnokov A. V. (2012). The concept of optimization of structures made of composite materials taking into account economic efficiency. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 9, 93–98. [In Russian].
- 11. Degtjarev A. V. (2014). *Rocket technology. Problems and prospects. Selected scientific and technical publications.* Dnepropetrovsk, ART-PRESS Publ. [In Russian].
- 12. Degtjarev A. V., Kovalenko V. A., Potapov A. V. (2012). The use of composite materials to create promising rocket technology. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, No. 2(89), 34–38 [In Russian].
- 13. Zabashta V. F. (1993). *Technical preparation for the production of structures made of composite materials*. Kiïv, Tehnika Publ. [In Russian].
- 14. Karpov Ja. S. (2006). *Compounds of parts and assemblies made of composite materials*. Kharkiv, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute Publ. [In Russian].
- 15. Kovalenko V. A. (2014). Scientific basis for the production technology of rocket and space technology units of regulated quality from polymer composite materials: Diss. ... d-ra tekhn. nauk. Kharkiv. [In Russian].
- 16. Kovalenko V. A., Moskovskaja N. M., Slivinskij V. I. (2011). Analysis and modification of mathematical models of quality indicators and methods for their determination in relation to products of rocket and space technology. *Voprosy proektirovani- ya i proizvodstva konstruktsii letatel'nykh apparatov*, **4**(68), 7–22 [In Russian].
- 17. Kondratenko A. N., Golubkova T. A. (2009). Polymer composite materials in products of foreign rocket and space technology (Review). *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*, No. 2, 24–35 [In Russian].
- 18. Kondratiev A. V. (2011). The concept of optimal design of aerospace products from polymer composite materials. *Sistemni tehnologi*ï, **4** (75), 28–34 [In Russian].
- 19. Lebedev I. K. (2011). *The operational durability of aircraft components made of composite materials*: avtoref. diss. ... kand. tehn. nauk. Moscow [In Russian].
- Linnik A. K., Krasnikova R. D., Lipovskij V. I., Baranov E. Ju. (2018). Composites in the construction of the body of the launch vehicles. System analysis of problems and prospects of development and application (ed. A. V. Degtjareva). Dnipro, LIRA Publ. [In Russian].

- 21. Mihajlin Ju. A. (2008). Structural Polymer Composite Materials. SPb.: NOT Publ. [In Russian].
- 22. Nemirovskij Ju. V., Jankovskij A. P. (2002). *Rational design of reinforced structures* (Ed. V. M Fomin). Novosibirsk, Nauka Publ. [In Russian].
- Potapov A. M., Kovalenko V. A., Kondratiev A. V., Gajdachuk V. E. (2017). Scientific support for the development of composite load-bearing compartments of the head block of launch vehicles. *Kosmicheskaja tehnika. Raketnoe vooruzhenie*, 2(114), 112–120 [In Russian].
- 24. Smerdov A. A. (2007). *Development of design methods for composite materials and structures of rocket and space technology*: Diss. ... d-ra tekhn. nauk. Moscow [In Russian].
- Suhov V. V., Zajpulaev M. V. (2000). General principles for assessing the technical and economic efficiency of technological processes for cutting aircraft structures. *Tehnologicheskie sistemy*, No. 2, 73–77 [In Russian].
- 26. Tarasov V. A., Kashuba L. A. (2006). *Theoretical Foundations of Rocket Technology*. Moscow: MGTU im. N. Je. Baumana Publ. [In Russian].
- Bychkov A. S., Kondratiev A. V. (2019). Criterion-based assessment of performance improvement for aircraft structural parts with thermal spray coatings. J. Superhard Materials, 41, No. 1, 53–59. https://doi.org/10.3103/S1063457619010088
- Gaidachuk V. E., Kondratiev A. V., Chesnokov A.V. (2017). Changes in the thermal and dimensional stability of the structure of a polymer composite after carbonization. *Mechanics of Composite Materials*, 52, No. 6, 799–806. https://doi.org/10.1007/s11029-017-9631-6
- 29. Kondratiev A. (2019). Improving the mass efficiency of a composite launch vehicle head fairing with a sandwich structure. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. **6**, No. 7 (102), 6–18. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184551
- Kondratiev A., Gaidachuk V. (2019). Weight-based optimization of sandwich shelled composite structures with a honeycomb filler. *Eastern-European J. Enterprise Technologies*. 1, No. 1 (97), 24–33. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154928
- Kondratiev A. V., Gaidachuk V. E., Kharchenko M. E. (2019). Relationships between the ultimate strengths of polymer composites in static bending, compression, and tension. *Mechanics of Composite Materials*, 55, No. 2, 259–266. https://doi. org/10.1007/s11029-019-09808-x
- Kondratiev A., Gaidachuk V., Nabokina T., Tsaritsynskyi A. (2020). New possibilities in creating of effective composite sizestable honeycomb structures designed for space purposes. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. *Adv. Intel.Syst. and Computing book ser. AISC 1113.* No. 5, 45–59. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_5
- Kondratiev A. V., Kovalenko V. O. (2019). Optimization of design parameters of the main composite fairing of the launch vehicle under simultaneous force and thermal loading. *Space Science and Technology*. 25, No. 4 (119), 3–21. https://doi. org/10.15407/knit2019.04.003
- Mackerle J. (2002). Finite element analyses of sandwich structures: a bibliography (1980–2001). Eng. Computations, No. 19:2, 206–245. https://doi.org/10.2514/2.991
- Malysheva N. R., Hurova A. M. (2019). Legal forms of public-private partnership for the space activity of Ukraine and its distinction from related forms of contractual cooperation. *Space Science and Technology*. 25, No. 1, 73–84. https://doi. org/10.15407/knit2019.01.073
- Milinevsky G., Yatskiv Y., Degtyaryov O., Syniavskyi I., Mishchenko M., Rosenbush V. (2016). New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, No. 123, 292–300. https://doi. org/10.1016/j.actaastro.2016.02.027
- Slyvyns'kyy V., Gajdachuk V., Gajdachuk A., Slyvyns'ka N. (2005). Weight optimization of honeycomb structures for space applications. 56th Int. Astronautical Congress (Japan, Fukuoka, 2005). IAC-05-C2.3.07.
- Vasiliev V. V., Barynin V. A., Razin A. F. (2012). Anisogrid composite lattice structures. Development and aerospace applications. *Composite Structures*, No. 94, 1117–1127.

Received 01.09.2020

A. V. Kondratiev

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Department of Construction Technology and Building Materials ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8101-1961

E-mail: kondratyev_a_v@ukr.net, andrii.kondratiev@khame.edu.ua

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

17 Marshal Bazhanov Street, Kharkiv, 61002, Ukraine

A CONCEPT OF OPTIMIZATION OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF POLYMER COMPOSITE ROCKET UNITS CONSIDERING THE CHARACTER OF THEIR PRODUCTION

We present a concept of optimization of structural and technological parameters of rocket and space technology units from polymer composite materials under heterogeneous loading and a project complex for their rational selection, taking into account the current level of production. The concept includes five interconnected components: design, production technologies, operation, ecology, and safety of industrial life. The analysis of possible criteria-based optimization estimates is carried out on the example of the technological component of the problem. Decompositions of the general task of parameters' optimization were carried out into a number of types that correspond to the main types of structures of the considered class of technology: load-bearing compartments of launch vehicles and precision structures of spacecraft. An integrated approach to the optimal design of the bearing compartments of the head block of launch vehicles of various structural and power schemes is proposed. A distinctive feature of the approach is the possibility of multifactor optimization of the parameters for units of the class under consideration while providing regulated load-bearing capacity with simultaneous power and heat loading, taking into account technological, operational, economic, and environmental restrictions that correspond to the existing level of their production. A conceptual approach to the synthesis of rational parameters of composite frames of solar panels of various structural and power circuits is proposed, based on the integrated realization of well-known principles implemented by relevant units that are integrated by computer technology into a single optimization complex. An integrated approach has been synthesized to create precision space structures from polymer composite materials, which makes it possible to obtain rational thermo-dimensionally stable composite structures. An algorithm for determining the rational structure of a composite package has been developed and implemented, which provides a compromise combination for the absolute values of the coefficient of linear thermal expansion keeping maximum precision of the product in accordance with the proposed criteria.

The results obtained made it possible to provide an increase by more than 20 % in the mass efficiency of the composite aggregates of rocket and space technology produced at the leading enterprises of the industry.

Keywords: parameters synthesis, optimization, optimal design, polymer composite materials, rocketry, concept, load-bearing schemes, constructional-technological solutions.

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.023 УДК 62-97/-98:536.24.08

Ю. А. ПОШТАРЕНКО, інж. Б. М. РАССАМАКІН, старш. наук. співроб., канд. тех. наук Ю. М. СИДОРЕНКО, старш. наук. співроб., д-р тех. наук В. І. ХОМІНІЧ, старш. наук. співроб., канд. тех. наук М. Д. ШЕВЧЕНКО, пров. інж.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

ДОСЛІДНИЦЬКО-ВИПРОБУВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ТЕРМОВАКУУМНИЙ СТЕНД ТВК—2,5

У повідомленні наведено додаткові конструкційні особливості модернізованого стенду ТВК-2,5, який забезпечує фізичну імітацію комплексного впливу на об'єкт основних факторів космічного простору — глибокого вакууму, кріогенних температур, сонячного та земного опромінювань, високого ступеня поглинання зовнішнім середовищем теплового випромінювання. Стенд уможливлює реалізацію внутрішнього тепловиділення об'єкта та динаміку проходження об'єктом заданої орбіти.

Ключові слова: термовакуумний стенд TBK-2,5, фактори космічного простору, наземні випробування, вакуум, продуктивність відкачування, кріогенні температури, опромінення, тепловиділення, інфрачервоне опромінення.

Безвідмовне функціонування та запланований строк активного життя об'єктів космічної техніки значною мірою забезпечується рівнем температур як на поверхнях, так і у об'ємах їхніх складових та об'єктів у цілому.

Розрахункові методи визначення величин граничних температур окремих виробів космічної техніки та космічних апаратів в цілому дають значні похибки. У зв'язку з цим виникає необхідність експериментального уточнення розрахункових даних. Для цього проводять відповідні наземні випробування в умовах, які імітують комплексний вплив факторів космічного простору. Згідно із Стандартом Європейського співтовариства з космічної стандартизації [4] наземні випробування є обов'язковими при створенні об'єктів космічної техніки.

Для проведення таких експериментальних досліджень та випробувань виробів космічної техніки (зокрема, їхніх наземних термовакуумних досліджень та випробувань) в КПІ ім. Ігоря Сікорського у 1994 р. було створено стенд ТВК-2,5, який використовувався у низці космічних проектів [1—3].

Даний стенд (рис. 1) забезпечує фізичну імітацію комплексного впливу на об'єкт основних факторів космічного простору — глибокого вакууму, кріогенних температур, сонячного та земного опромінень, високий ступінь поглинання зовнішнім середовищем теплового випроміню-

Цитування: Поштаренко Ю. А., Рассамакін Б. М., Сидоренко Ю. М., Хомініч В. І., Шевченко М. Д. Дослідницько-випробувальний експериментальний термовакуумний стенд ТВК–2,5. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 23–26. https://doi.org/10.15407/knit2020.06.023



Рис. 1. Експериментальний стенд ТВК-2,5: 1 — камера вакуумна, 2 — рама з напрямачами, 3 — верхня кришка вакуумної камери, 4 — вхідні патрубки умовного проходу Ду300 і фланцями, 5 — візок переміщення верхньої кришки з механізмом її підйому, 6 — насоси високовакуумні турбомолекулярні з вертикальним валом (ТМН-2500) з їхніми механічними опорами 7, 8 — вхідні патрубки умовного проходу Ду400 з фланцями, 9 — оглядове вікно діаметром 130 мм, 10 — оглядове вікно діаметром 190 мм, 11 — блок вакуумщільних електричних роз'ємів, 12 — стійка приладів керування та діагностики, 13 — бустерний об'єм 0.08 м³, 14 — затвор високовакуумний, 15 — пастка кріогенна азотна, 16 — насоси магніторозрядні діодні НМД-04-1, 17 — вакуумні давачі, 18 — натікач, 19 — насос турбомолекулярний з горизонтальним валом ТМН-500, 20 — вакуумні давачі, 21 — затвор високовакуумний, 22 — трубки кріопанелей, 23 — пластини кріопанелей

вання. На стенді можна зреалізувати внутрішнє тепловиділення об'єкта та динаміку проходження об'єктом заданої орбіти.

За останні два роки було проведено чергову технічну модернізацію стенда, яка полягала у наступному.

1. Високовакуумні насоси НВГМ-2М (продуктивністю 2000 л/с по азоту та Н400/7000 продуктивністю 5000 л/с по азоту) замінено на два турбомолекулярних насоси продуктивністю 2500 л/с кожний. Це дозволяє з урахуванням конструктивних особливостей вакуумної системи забезпечити відкачування неагресивних газів з масовими числами до 131. Нова фактична продуктивність високовакуумної системи без врахування сорбційної здатності кріопанелей становить 4000 л/с. При спільній роботі турбомолекулярних насосів із охолодженими кріоекранами сумарною площею 7.2 м³ за рахунок адсорбції газів на кріопанелях, що мають температури, менші за температури їхньої конденсації, потужність високовакуумної відкачувальної системи зростає.

2. Модернізовано форвакуумну групу насосів, яка на сьогодні забезпечує швидкість відкачування до 140 л/с.

3. Експериментальні дослідження вакуумної системи стенда показали відповідність розрахункових та експериментальних даних. Наприклад, при газовому навантаженні (відкачуванні потоку ксенону потужністю 2 мг/с) та початковому залишковому тиску у камері 5·10⁻⁵ торр в



Рис. 2. Загальний вигляд експериментального стенда TBK-2,5

динамічному режимі в останній підтримується залишковий тиск 5·10⁻⁴ торр.

4. На вакуумній камері встановлено два ілюмінатори з оптичного скла діаметром 130 мм та 190 мм, що дозволяє візуально спостерігати ззовні за об'єктами досліджень та випробувань безпосередньо у вакуумній камері.

5. Збільшено кількість вакуумщільних електричних вводів: низьковольтних до 8 (50 контактів кожний), високовольтних силових — до 6. Кількість електричних вакуумних вводів та їхню номенклатуру за потреби може бути змінено.

6. На верхньому фланці камери встановлено вакуумущільнений привід крокового двигуна, що дозволяє забезпечити в автоматичному режимі у реальному часі відтворення циклограм проходження космічним апаратом штатних орбіт.

7. На основі ніхромових нагрівачів створено ряд джерел інфрачервоного опромінення, які керуються функціонально або за табульованими функціями та імітують тепловий вплив від Сонця, Землі та інших астрономічних об'єктів.

8. Удосконалено багатоканальну вимірювальну автоматичну систему діагностування теплових потоків шляхом впровадження нових давачів теплового потоку та забезпечено візуалізацію теплових полів об'єктів за допомогою засобів обчислювальної техніки.

На сьогодні модернізований тепловакуумний експериментальний стенд ТВК-2,5 відповідає сучасним вимогам досліджень і випробувань об'єктів космічної техніки згідно з нормами Європейського співтовариства [4] та дозволяє отримувати науково обґрунтовані рекомендації зі створення надійних виробів космічного призначення нового покоління.

Загальний вигляд стенда приведено на рис. 2.

ЛІТЕРАТУРА

- Рассамакин Б. М., Душейко М. Г., Байсков Н. Ф., Остапчук С. В., Лауш А. Г., Ланевский Е. В., Хоминич В. И., Мельник Р. С. *Наноспутники серии «POLYITAN»: результаты испытаний и планы развития*. Науч. работы X Междунар. науч. конф. «Функциональные основы наноэлектроники». Список науч. работ. Харьков-Одесса, 2019. С. 164—173.
- 2. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И., Петров Ю. В., Хайрнасов С. М. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. І. Термовакуумная установка ТВК-2,5. *Космічна наука і технологія*. 2002. **8**, № 1. С. 37—41.
- 3. Рассамакин Б. М., Рогачев В. А., Хоминич В. И., Петров Ю. В., Хайрнасов С. М. Экспериментальное моделирование тепловых режимов малогабаритных космических аппаратов и их внешних тепловых потоков. П. Результаты тепловакуумных испытаний макета микроспутника типа MC – 1 – TK – TB. *Космічна наука і технологія*. 2002. **8**, № 4. С. 3–10.
- 4. Стандарт Європейського співтовариства з космічної стандартизації. Космічні проектно-конструкторські розробки: Випробування / ECSS-E-ST-10-03C. [Введено в дію від 2012–06–12: Секретаріат ECSS ESA-FSTEC, Відділ стандартів і вимог]. Нордвік, Нідерланди, 2012. 176 с.

Стаття надійшла до редакції 08.10.2020

REFERENCES

- Rassamakin B. M., Ducheiko M. G., Bayskov M. F., Ostapchuk S. W., Lauch A. G., Lanevsky E. W., Hominich V. I., Melnyk R. S. (2019). Nanosatellites of the POLYITAN series: results of experiments and prospects for development. Scientific works of the X Int. Sci. Conf. "Functional Basis of Nanoelectronics" are included in the Collection: X International Scientific Conference "Functional Basis of Nanoelectronics" Collection of Scientific Works. Kharkiv-Odesa, 164–173.
- Rassamakin B. M., Rogachyov V. A., Hominich V. I., Petrov Yu. V., Khairnasov S. M. (2002). Experimental modeling of thermal modes of small-sized space apparatus and their outer thermal flows. I. Thermal vacuum stand TVK-2,5. *Space Sci*ence and Technology, 8 (1), 37–41 [in Russian].
- 3. Rassamakin B. M., Rogachyov V. A., Hominich V. I., Petrov Yu. V., Khairnasov S. M. (2002). Thermal conditions of a smallsized space devices and their external heat flows experimental modeling. II. Thermovacuum tests of microsatellite model MC – 1 – TK – TB results. *Space Science and Technology*, **8** (4), 3–10 [in Russian].
- 4. ECSS-E-ST-10-03C 2012–06–12 / Space engineering. Testing. ECSS Secretariat ESA-ESTEC/ Requirements & Standards Division. Noordwijk, The Netherlands.

Received 08.10.2020

Yu. A. Poshtarenko, engineer *B. M. Rassamakin*, senior researcher, Ph.D. in Tech *Yu. M. Sydorenko*, senior researcher, D.Sc. in Tech

V. I. Khominich, senior researcher, Ph.D. in Tech

M. D. Shevchenko, leading engineer

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

37 Peremohy Ave, Kyiv, 03056 Ukraine

RESEARCH AND TESTING EXPERIMENTAL THERMAL VACUUM STAND TVK-2,5

We present additional design features of the upgraded stand TVK-2,5, which provides a physical imitation of the complex effect on the object of the main factors of outer space, namely, deep vacuum, cryogenic temperatures, solar and terrestrial radiation, a high degree of absorption of thermal radiation by the external environment. The stand can be used to implement the internal heat release of the object and the dynamics of the object passing a given orbit.

Keywords: thermal-vacuum stand TVK-2,5, space factors, on-site tests, vacuum, pumping efficiency, cryogenic temperatures, radiation, heat release, infrared radiation.

Дослідження Землі з космосу

Study of the Earth from Space

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.027 УДК 528.88; 519.9; 004.932

А. Ю. ШЕЛЕСТОВ^{1,2}, проф. кафедри інформаційної безпеки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», пров. наук. співроб. Інституту космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України, д-р техн. наук, проф.

Б. Я. ЯЙЛИМОВ¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук

E-mail: yailymov@gmail.com

Г. О. ЯЙЛИМОВА ³, аспірантка

Ю. В. БІЛОКОНСЬКА¹, молод. наук. співроб.

О. В. НІВ'ЄВСЬКИЙ ⁴, проф. Київської школи економіки та координатор дослідницького проекту UaFoodTrade, який виконується спільно з Лейбніц-Інститутом аграрного розвитку в країнах з перехідною економікою (IAMO), д-р філософії

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України Проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1, Київ, Україна, 03187

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

³ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

вул. Володимирська 64/13, Київ, Україна, 01601

⁴ Київська школа економіки

вул. Дмитрівська 92-94, Київ, Україна, 02000

СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ ПОСІВІВ ПО УКРАЇНІ

Забезпечення подальшого економічного зростання сільського господарства України потребує освоєння та ефективного використання інноваційних технологій. Зокрема, супутниковий аналіз дає можливість відслідковувати стан сільськогосподарських угідь шляхом моніторингу їхніх якісних та кількісних показників природно-кліматичних характеристик. У рамках проєкту Світового банку «Підтримка прозорого землекористування в Україні» у співпраці комерційної компанії EOS Data Analytics із Інститутом космічних досліджень НАН України та ДКА України розроблено технологію супутникового моніторингу використання сільськогосподарських земель в Україні. На основі створеної технології побудовано карти класифікації земного покриву на базі трьох наборів даних: наземні дані вздовж доріг, дані фермерів та супутникові дані (часові ряди оптичних даних «Sentinel-2» та радарних даних «Sentinel-1»). Для створення карт класифікацій використано алгоритм Random Forest, реалізований на базі хмарної платформи Google Earth Engine. Отримано оцінку точності та порівняні площі посівів сільськогосподарських культур по всій території України. За результатами експерименту наведено порівняння класифікації на двох окремих наборах даних для навчання — наземних даних, зібраних вздовж доріг, та даних фермерів. В результаті отримано валідовану карту посівів сільськогосподарських культур, яку було представлено на офіційному порталі ДержГео Кадастру України. Наведено основні результати, отримані в ході аналізу сільськогосподарських земель України, а також результати порівняння зі статистичними даними.

Ключові слова: супутниковий моніторинг, землекористування, Світовий банк, інноваційні технології, дистанційне зондування, карта класифікації земного покриву, часові ряди супутникових даних.

Цитування: Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Яйлимова Г. О., Білоконська Ю. В., Нів'євський О. В. Супутниковий моніторинг посівів по Україні. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 27—37. https://doi.org/10.15407/ knit2020.06.027

вступ

Сільськогосподарський сектор України забезпечує значну частку експорту продукції до країн Євросоюзу, Азії, Америки, а інтенсивний розвиток робить його одним з важливих чинників розвитку економіки та сприяє покращенню міжнародних економічних зв'язків. Аналіз обсягів валової продукції світового аграрного сектору показує, що Україна в рази поступається країнам з аналогічними агрокліматичними умовами за прибутковістю (для України валова продукція сільськогосподарських культур за 2018 рік становить 6.4 млрд євро, а для Іспанії та Франції відповідно 25.7 та 42.4 млрд євро) [21]. При цьому у світовому рейтингу країн за використанням земель сільськогосподарського призначення Україна посідає 8-ме місце, Франція — 14-те, а Іспанія — 18-те.

Досвід використання супутникових даних у аграрній сфері вже має чимало розвинених країн світу. Так, Міністерство сільського господарства США (USDA) щороку використовує карти земного покриву (Cropland Data Layer) для оцінки врожайності та площ культур в США [14]. Департамент з питань довкілля, харчових продуктів та сільського господарства (Defra) Великобританії використовує карти земного покриву як основний інструмент для аналізу та створення інноваційних продуктів та послуг для країни [16].

У Канаді щорічно створюються карти посівів сільськогосподарських культур, які використовуються Департаментом сільського господарства та агропродовольства (ААFC) для прогнозу врожайності та прийняття обґрунтованих управлінських рішень та для оцінки конкурентоспроможності сільського господарства. Особлива увага приділяється п'яти основним культурам (пшениця, ячмінь, ріпак, кукурудза на зерно та соя) [2].

До недавнього часу в Україні на державному рівні карти земного покриву не використовувалися. Це пов'язано із з нерозумінням можливостей, які відкривають дані такого типу і, як результат, відсутністю самої карти у держави. Проте за рахунок чинної програми Світового Банку «Підтримка прозорого землекористування в Україні» ця ситуація значно покращується, і карти класифікації земного покриву стають важливим джерелом додаткової інформації для управлінських органів.

Низький рівень використання сучасних технологій підприємствами та державними структурами є основною причиною відносно низького рівня прибутку із сільськогосподарських угідь. За умови побудови карти класифікації та її використанні як базовий інформаційний продукт можна розв'язувати багато інших важливих практичних задач. Зокрема, здійснювати оперативний моніторинг стану посівів протягом всього вегетаційного періоду, виявляти «виснажену землю» [1, 4] та проводити розрахунки економічно вигідних способів ведення господарства (в тому числі і за рахунок зменшення витрат), відслідковувати порушення сівозмін. Одним із способів вирішення цих проблем є використання сучасних супутникових технологій для оптимізації вибору типів сільськогосподарських культур.

Крім цього, запровадження технологій супутникового агромоніторингу у процес керування сільськогосподарськими угіддями стає ще більш актуальним напередодні відкриття ринку землі, запланованого на 2020 рік. Механізм використання супутникових даних відкриває доступ до об'єктивної історії користування земельними ресурсами [12, 13], створює правові, технічні та законодавчі передумови прозорого, справедливого та надійного процесу землеволодіння та землекористування.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для забезпечення прозорості, справедливості та надійності процесу оренди землі, а у майбутньому і продажу, необхідна об'єктивна інформація про реальне землекористування та його історію, стан розвитку сільськогосподарських культур за кожен сезон. Усі ці показники суттєво впливають на ринкову вартість землі. Однак в Україні немає загальнодоступної системи з інформацією про реальне землекористування та власників земель. Ця інформація міститься лише в державній кадастровій системі та не є доступною для користувачів. Саме тому постає задача створення продукту, який дасть змогу проводити моніторинг та робити аналіз стану полів як за поточний, так і за попередні роки.



Puc. 1. Маршрути збирання даних для озимих та літніх культур

У межах проєкту Світового банку за фінансової підтримки ЄС одним із напрямів роботи є використання супутникових даних для вирішення задачі моніторингу землекористування на території України. У попередні роки використовувались невеликі пілотні райони та області, на яких відпрацьовувались технології. Цього року для комерційної компанії EOS Data Analytics та Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України, які спільно виконують цей проєкт, було поставлено завдання розширення до масштабів усієї країни методології побудови карти земного покриву, розробленої під час виконання пілотного проєкту у 2018 році для трьох областей України [6, 8—10]. У перспективі до 2023 року в державних установах планується розробити та впровадити оперативну технологію супутникового моніторингу.

ВХІДНІ ДАНІ

Традиційно навчання моделей для побудови карти земного покриву провадиться на основі часових рядів супутникової інформації, а для навчання використовуються наземні дані. Для побудови карти класифікації було використано такі набори даних.

Наземні дані вздовж доріг. Для виконання проєкту у 2019 році наземні дані були зібрані вздовж доріг [22] згідно з протоколом JECAM щодо збору наземних даних [3]. Збір даних відбувався по території всієї України у два етапи: у квітні збір озимих культур, у червні — збір літніх культур. Маршрути будувалися із врахуванням різнорідності культур та кліматичних зон. Також для планування маршрутів враховано відсоток сільськогосподарських площ по областях відносно всієї площі орних земель України (рис. 1).

Розподіл зібраних наземних даних вздовж доріг по типах культур корелює із розподілом площ мажоритарних культур в Україні. Дані, що стосуються несільськогосподарських типів земного покриву, частково також збиралися під час наземних досліджень, але здебільшого були додані по фотоінтерпретації на основі безхмарних оптичних даних та шляхом використання відкритих джерел інформації (табл. 1). Таблиця 1. Розподіл зібраних наземних даних вздовж доріг та доданих по фотоінтерпретації класів, які були використані для побудови карт класифікації у 2019 р.

Сільськогосподарські класи			
Зернові культури	3573		
Соняшник	1371		
Кукурудза	1141		
Соя	740		
Ріпак	566		
Інші культури	221		
Люцерна	79		
Горох	71		
Буряк	65		
Гречка	23		
Не сільськогосподарсь	кі класи		
Необроблювані землі	1754		
Вода	678		
Виноградники	455		
Ліс	447		
Штучні об'єкти	445		
Сади	367		
Піски, кар'єри	250		
Болото	221		

Таблиця 2.	Розподіл	даних	фермерів	по	культурах
100000000000 20	1 00110,4111		4 epinepino		

Культура	Дані фермерів (кількість)		
Зернові культури	659		
Соняшник	779		
Кукурудза	1681		
Соя	429		
Ріпак	528		
Загалом	4076		

Дані фермерів. Цього року збір наземної інформації відбувався також за участі фермерів, які надали інформацію про свої поля. Ці дані наявні лише для п'яти областей України та містять в собі інформацію лише про мажоритарні культури (зернові культури, соняшник, кукурудзу, сою та ріпак). На відміну від зібраних наземних даних для даних фермерів немає кореляції з площами посівів по зернових культурах та кукурудзі. Розподіл класів приведено в табл. 2.

На рис. 2 показано територіальне розташування даних фермерів відносно адміністративних областей та кліматичних зон України.

Супутникові дані, а саме часові ряди оптичних даних «Sentinel-2» та радарних даних «Sentinel-1» з просторовим розрізненням 10 м за період з 1 квітня по 15 жовтня. Саме цей період є показовим для сільськогосподарських культур, які висівають фермери та селяни на своїх землях. На рис. 3 показано покриття території України гранулами супутників «Sentinel-1» та «Sentinel-2».

МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ

У 2020 р. у межах виконаних робіт побудовано карту класифікації за допомогою двох алгоритмів — Random Forest, реалізованого у відкритій хмарній платформі Google Earth Engine (GEE) [17, 18] та власного алгоритма компанії ЕОЅ Data Analytics із використанням конволюційних нейронних мереж, а також здійснено порівняльний аналіз отриманих результатів. Нижче ми будемо розглядати результати, отримані з використанням Random Forest. Random Forest — один з популярних методів машинного навчання, що полягає у використанні ансамблю дерев рішень та застосовується для задач класифікації, регресії і кластеризації. Дерево рішень будується на основі навчальної вибірки та використовує поняття інформаційної ентропії. На кожному вузлі дерева вибирається один атрибут з даних, який найбільш ефективно розбиває навчальну множину на підмножини, що максимально відрізняються між собою.

В даному класифікаторі найбільш чутливим параметром для точності класифікації є кількість дерев. Для зменшення чутливості та подолання схильності до перенавчання використано такі технології, як прорідження (pruning) вже отриманого дерева. Використаний метод класифікації описано в роботах [5—11]. В рамках цієї роботи використано 100 дерев, а для зниження чутливості та подолання схильності до перенавчання використовуються такі технології, як обрізка вже отриманого дерева. Класифікатор RF



Рис. 2. Територіальне розташування даних фермерів у адміністративних областях та кліматичних зонах України



Рис. 3. Покриття оптичними та радарними даними території України

використовує дані різних супутників (радарні «Sentinel-1» та оптичні «Sentinel-2»), об'єднані в один часовий ряд. Супутникові дані за вегетаційний період містять часову складову, що відображається на зміні вегетативних характеристик рослин, що особливо важливо у задачі розпізнавання культури. Зібрані наземні дані попередньо розділені на дві рівні частини — одна для навчання, а інша — для тестування обох результатів. Вибір описаної методології, що базується на використанні часових рядів супутникової інформації [5], пояснюється практичною неможливістю визначити вид сільськогосподарської культури, маючи в розпорядженні лише однедва супутникові зображення. Зробити це можна лише в одиничних випадках (наприклад, дуже добре видно озимий ріпак під час його цвітіння або озимі зернові культури навесні). Такі ж культури, як соняшник, соя, кукурудза, буряк, гречка не мають очевидних ознак відмінності між собою при використанні лише оптичної інформації. До того ж одним із найосновніших недоліків оптичних знімків є висока чутливість до хмар та тіней. Тому вказати тип культури із найвищою точністю можна лише з використанням радіометричних даних «Sentinel-1» разом з оптичними даними «Sentinel-2» наприкінці сезону.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

В роботі проведено експеримент із порівнянням результатів класифікації на двох окремих наборах даних для навчання — наземних даних, зібраних вздовж доріг, та даних фермерів. Цей експеримент дає можливість оцінити можливість заміни збору наземних даних набором даних, яким володіють фермери, для економії як людських ресурсів, так і фінансових витрат на збір даних.

Традиційним способом оцінки точності карт земного покриву є побудова матриці невідпо-

Таблиця З. Значення точності карти класифікації

Клас	UA	PA	F1
Штучні об'єкти	57.1	92.5	70.6
Зернові культури	96.3	99.3	97.8
Ріпак	98.1	99.7	98.9
Гречка	100	13.7	24
Кукурудза	95.7	98.1	96.9
Буряк	93.1	80.9	86.6
Соняшник	97.4	99	98.2
Соя	90.1	84	86.9
Інші культури	43.3	28.5	34.4
Ліс	83.6	99.8	91
Необроблювані землі	71.4	92.4	80.5
Відкритий ґрунт	76.1	55.2	64
Вода	100	98.4	99.2
Болото	92.3	48.4	63.5
Горох	98.5	52.7	68.6
Трави	97.2	52.9	68.5
Сади, парки, лісополоси	76.2	48.1	59
Виноградники	97	30.6	46.6
Загальна точність		94.8	

Примітка. РА — точність виробника, UA — точність користувача, F1 — точність рівня F1.

відності на основі незалежних даних, які не використовувалися при побудові самої карти. Альтернативним шляхом оцінки результату є порівняння отриманих площ із офіційними статистичними даними [20].

Аналіз точності карти класифікації, отриманої на основі даних вздовж доріг, проведено на тестовій незалежній вибірці. В результаті загальна точність карти класифікації становить 94.8 %. Точності карти класифікації по класах наведено у табл. 3.

Отриману карту класифікації було порівняно зі статистичною інформацією (рис. 4).

З огляду на наявність незалежного набору даних від фермерів, на їхній основі було побудовано незалежну класифікацію. На основі тестових незалежних даних отримано оцінку загальної точності карти класифікації, яка дорівнює 87 %. Нижче наведено порівняння точностей карт, отриманих на основі даних фермерів та наземних даних по п'яти мажоритарних культурах (табл. 4).

З діаграми, приведеної на рис. 5, що при побудові карти з використанням даних фермерів стається значна недооцінка загальної площі орних земель по території України. Зокрема, найбільша розбіжність типова для областей степової зони — Одеської, Херсонської, Запорізької та Криму.

Така значна розбіжність пов'язана з тим, що скупчення даних фермерів розташоване у п'яти областях та майже в одній кліматичній зоні. Саме це і є причиною того, що південні області, які відрізняються погодними умовами від центральних та західних областей, мають в результаті значну недооцінку площ на карті класифікації. Проте для областей, які лежать в тій самій кліматичній зоні, але віддалені від навчальних даних, різниця також є значною (наприклад, для Харківської області).

На рис. 6 зображено фрагмент карти класифікації з використанням лише точок від фермерів та карта на основі зібраних наземних даних. Видно, що великі масиви оброблюваних земель розпізнаються як необроблювані.

Аналізуючи отримані точності та порівнюючи площі посівів, можна зробити висновки про те, що дані фермерів не можуть замінити якісного



Рис. 4. Порівняння загальної площі сільськогосподарських культур по областях (2019 р.)

Таблиця 4. Порівняння точностей мажоритарних класів при побудові карти класифікації на основі даних фермерів та на основі наземних даних

Мажоритарні	На основі даних фермерів			На основі наземних даних			
культури	РА	UA	F1	PA	UA	F1	
Зернові культури	87.9	98.2	92.7	99.3	96.3	<u>97.8</u>	
Ріпак	96.6	95.8	96.2	99.7	98.1	<u>98.9</u>	
Кукурудза	96.8	84	89.9	98.1	95.7	<u>96.9</u>	
Соняшник	90.3	95	92.6	99	97.4	<u>98.2</u>	
Соя	71.1	73.6	72.3	84	90.1	<u>86.9</u>	
Загальна точність	87.1		альна точність 87.1 94.8				

збору наземних даних. Проте їх можна використовувати як додаткову наземну інформацію, яка забезпечує незалежну перевірку точності моделі, побудованої на основі зібраних даних. Зокрема, карту, отриману алгоритмом RF на основі зібраних наземних даних, було валідовано незалежними даними фермерів. Загальна точність зернових культур склала 98 %, ріпаку — 97.1 %, кукурудзи — 96 %, соняшнику — 95.5 %, сої — 82 %. Ці результати добре корелюють із отриманими точностями на основі тестової незалежної вибірки, яку зібрано вздовж доріг.

по території всієї України, з якою можна ознайомитися на офіційному порталі ДержГеоКадастру України [15], є основним надбанням та результатом проєкту. Геопортал дає безкоштовний доступ до продуктів аналізу геопросторових даних, а користуватися цим сервісом можуть державні та місцеві органи влади, а також територіальні громади. Із використанням отриманих карт класифікації за кілька років поспіль відкривається більше можливостей при розв'язанні прикладних задач для сільського господарства. Зокре-

Карта посівів сільськогосподарських культур



Рис. 5. Відхилення загальної посівної площі при побудові карти класифікації земного покриву на основі даних фермерів від площі по карті на основі наземних даних



Рис. 6. Аналіз отриманої карти класифікації на основі інформації, наданої власниками сільськогосподарських угідь: *a* — положення тестової ділянки, *б* — використання лише точок від фермерів, *в* — карта на основі зібраних наземних даних

ма, маючи карти класифікації з 2016 по 2019 рр. можна визначити поля, які чотири роки поспіль були засіяні соняшником. За умови правильного використання земельних ресурсів соняшник на одному полі може висіватися один раз на сім років, інакше це дуже виснажує землю. Найбільші території, для яких ця умова не дотримується, виявлено у Миколаївській та Кіровоградській областях, а їхня площа становить приблизно 35 тис. га у кожній з областей. Подібна інформація має бути корисною як для місцевих органів влади, так і для державних для правильного використання земельних ресурсів.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в межах проєкту Світового банку на основі різних незалежних наземних даних отримано карти класифікації земного покриву із 10-метровим просторовим розрізненням для всієї території України. Загальна точність при цьому варіює від 87 % на основі даних фермерів до 94 % на основі зібраних даних вздовж доріг, що дає підстави стверджувати, що використання лише даних фермерів не є достатнім для отримання якісної карти. Також при порівнянні посівних площ при використанні даних фермерів спостерігалась значна недооцінка порівняно із статистичною інформацією та картою на основі зібраних наземних даних.

Використання отриманої карти класифікації дозволяє розв'язувати низку прикладних задач. Зокрема, сільськогосподарські товаровиробни-

ки можуть аналізувати поточний стан сільськогосподарських ділянок, заздалегідь передбачити врожайність та зрозуміти, які зміни клімату можуть вплинути на прибуток господарства. Також використання супутникової інформації дозволить уряду проводити щотижневий моніторинг розвитку сільськогосподарських культур, порівнювати стан сільськогосподарських культур із середньорічною тенденцією та минулими роками, оцінювати площі посівів за якісними та кількісними показниками та кластерувати поля за умовами розвитку сільськогосподарських культур.

Такий вид контролю допоможе уникнути явища «неоподаткованого» володіння землею, порушення сівозміни або руйнівного використання земельних ресурсів. Фінансова стабільність українських фермерів напряму залежить від можливості належним чином аналізувати поточний стан балансу та складати бізнес-плани на наступні робочі періоди, серед яких: побудова правильного сценарію інтеграції у світовий ринок продовольства; зменшення коливань ціни на врожай; оцінка сільськогосподарських ризиків, що призводять до не завищення потенційних загроз врожаю; затвердження кредитних ліній для фермерів із меншим відсотком.

Всі перераховані фактори є надзвичайно важливими для розвитку ринку сільського господарства України. Супутниковий моніторинг — це інформаційна підтримка для кожного з учасників економічної ланки сільського господарства України.

REFERENCES

- 1. Yailymov B. Ya., Lavreniuk M. S., Shelestov A. Yu., Kolotii A. V., Yailymova H. O., Fedorov O. P. (2018). Methods of essential variables determination for the Earth's surface state assessing. Space Science and Technology, 24(4), 24–37. doi: doi. org/10.15407/knit2018.04.026.
- 2. Agriculture and Agri-Food Canada. URL: https://www5.agr.gc.ca/eng/?id=1343066456961 (Last accessed: 03.03.2020).
- 3. Joint Experiment for Crop Assessment and Monitoring. URL: http://jecam.org/documents/ (Last accessed: 03.03.2020).
- Kussul N., Kolotii A., Shelestov A., Yailymov B., Lavreniuk M. (2017). Land degradation estimation from global and national satellite based datasets within UN program. 9th IEEE Int. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 383–386. doi: 10.1109/IDAACS.2017.8095109.
- Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Skakun S. (2018). Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *Eur. J. Remote Sens.*, 51, 627–636. doi: 10.1080/22797254.2018.1454265
- 6. Kussul N., Nizalov D., Shelestov A., et al. (2019). Satellite crop monitoring within World Bank project on land management transparency. 2019 World Bank conference on land and poverty, Washington, USA. URL: https://www.conftool.com/lan-

dandpoverty2019/index.php/10-11-Kussul- 1192_paper.pdf?page=downloadPaper&filename=10-11-Kussul-1192_paper.pdf&form_id=1192&form_version=final (Last accessed: 03.03.2020).

- Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., et al. (2016). Deep learning approach for large scale land cover mapping based on remote sensing data fusion. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 198–201. doi: 10.1109/igarss.2016.7729043.
- Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., et al. (2019). Crop Mapping Based on Sentinel-1 and Sentinel-2 Data Within World Bank Project. Earth Observation Phi-Week, Rome, Italy. URL: https://phiweek.esa.int/NikalWebsitePortal/esa-eo-phiweek-2019/phiweek/Speaker# (Last accessed: 03.03.2020).
- Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., et al. (2019). Land Cover and Land Use Monitoring Based on Satellite Data within World Bank Project. 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT), Leeds, United Kingdom, 127–130. doi: 10.1109/DESSERT.2019.8770040.
- Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., et al. (2019). Transparent Land Governance in Ukraine within World Bank Program. IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 1077–1080. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879771
- Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A. (2018). Deep Learning Crop Classification Approach Based on Sparse Coding of Time Series of Satellite Data. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia, Spain, 4816– 4819. doi: 10.1109/igarss.2018.8518263.
- Lavreniuk, M., Kussul, N., Shelestov, A., et al. (2016). Validation methods for regional retrospective high resolution land cover for Ukraine. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 4502–4505. doi: 10.1109/igarss.2016.7730174.
- Lavreniuk, M., Kussul, N., Shelestov, A., et al. (2018). Object-Based Postprocessing Method for Crop Classification MAPS. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 7062—7065. doi: 10.1109/igarss.2018.8519199.
- 14. National Agriculture Statistics Service in USA. URL: https://nassgeodata.gmu.edu/CropScape/ (Last accessed: 03.03.2020).
- 15. Public cadastral map of Ukraine. URL: https://newmap.land.gov.ua/ (Last accessed: 03.03.2020).
- 16. Roadmap for the use of Earth Observation across Defra 2015–2020. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/488133/defra-earth-obs-roadmap-2015.pdf (Last accessed: 03.03.2020).
- Shelestov A. Yu., Lavreniuk M. S., Kussul N. M. (2016). Large scale crop mapping in Ukraine using Google Earth Engine. The American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA. URL: https://www.researchgate.net/publication/311922147_Large_scale_crop_mapping_in_Ukraine_using_Google_Earth_Enginet (Last accessed: 03.03.2020).
- Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., et al. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. Frontiers in Earth Science. 5. URL: https://www. frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2017.00017/full. doi: 10.3389/feart.2017.00017 (Last accessed: 03.03.2020).
- Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., et al. (2019). Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery. IEEE Transactions on Big Data (Early Access), 1-1. doi: 10.1109/TBDATA.2019.2940237.
- 20. State Statistics Service of Ukraine. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/ (Last accessed: 03.03.2020).
- 21. UNO Food and Agriculture Organization. URL: http://www.fao.org/ (Last accessed: 03.03.2020).
- Waldner F., Bellemans N., Hochman Z., et al. (2019). Roadside collection of training data for cropland mapping is viable when environmental and management gradients are surveyed. *Int. J. Appl. Earth Observ. and Geoinform.*, 80, 82–93. doi: 10.1016/j.jag.2019.01.002.

Received 03.03.2020
A. Shelestov ^{1,2}, Prof. at the Department of Information Security, Leading Researcher, Dr. Sci. in Tech., Full Professor B. Yailymov¹, Senior Researcher, Ph. D. in Tech. E-mail: vailvmov@gmail.com H. Yailymova³, Ph. D. student Y. Bilokonska¹, Junior Researcher O. Nivievskyi⁴, Prof. at Kyiv School of Economics, Coordinator of the Research Project UaFoodTrade carried out jointly with The Leibniz Institute of Agricultural Development in Transition Economies (IAMO), Ph. D. ¹ Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine 40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine National Technical University of Ukraine, Kyiv, Ukraine ² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" 37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056 Ukraine ³ Taras Shevchenko National University of Kyiv 64/13 Volodymyrska Str., Kyiv, 01601 Ukraine ⁴ Kyiv School of Economics

92-94 Dmytrivska Str., Kyiv, 02000 Ukraine

SATELLITE CROP MONITORING FOR UKRAINE

Support of the economic growth of Ukrainian agriculture requires the development and effective use of innovative technologies. In particular, satellite analysis makes it possible to monitor the state of agricultural land by monitoring their qualitative and quantitative indicators of natural and climatic characteristics. Satellite monitoring of agricultural land use in Ukraine has been developed within the World Bank program "Supporting Transparent Land Governance in Ukraine" in collaboration with EOS Data Analytics and Space Research Institute National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine. Based on the developed technology, classification maps of the land cover were built based on three data sets: ground data along roads, farmers' data, and satellite data (time series of "Sentinel-2" optical data and Sentinel-1 radar data). To create classification maps, the Random Forest algorithm was used, which is implemented on the Google Earth Engine cloud platform. An accuracy assessment was carried out, and crop compared areas throughout Ukraine were obtained. According to the results of the experiment, a comparison of the classification obtained from two separate training data sets (ground data collected along roads and data of farmers) is given. As a result, a validated crop map was obtained. The map is presented on the official web-portal of the State Geocadastre of Ukraine. The main results of the analysis of the agricultural lands of Ukraine, as well as, the results of comparisons with statistical data, are presented.

Keywords: satellite monitoring, land use, World Bank, innovative technologies, remote sensing, land cover classification map, time series of satellite data.

Космічна й атмосферна фізика

Space and Atmospheric Physics

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.038 УДК 621.396.98:629.783

Ю. П. ФЕДОРЕНКО

старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук E-mail: FedorenkoYP@gmail.com

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна пл. Свободи 4; Харків, Україна, 61022

ЗАЛЕЖНІСТЬ ПРОСТОРОВОГО ПЕРІОДУ РУХОМИХ ІОНОСФЕРНИХ ЗБУРЕНЬ ВІД ЇХНЬОЇ ВІДНОСНОЇ АМПЛІТУДИ

Експериментально досліджено зв'язок горизонтального просторового періоду L і відносної амплітуди A_d рухомих іоносферних збурень (PI3) при різних рівнях сонячної і геомагнітної активності. Досліджені PI3 у переважній більшості випадків породжувалися високоширотними джерелами. Встановлено, що для середньомасштабних PI3 (L = 100...800 км) значення L і A_d пов'язані лінійною залежністю, на яку не впливає рівень сонячної активності. Для великомасштабних PI3 (L = 100...800 км) значення = 1000...4000 км) лінійна апроксимація $L(A_d)$ при низьких і високих рівнях сонячної активності є відповідно зростаючою і спадною залежностями. Для PI3 глобальних масштабів (L = 5000...35000 км) при низьких рівнях сонячної активності лінійна апроксимація $L(A_d)$ є залежністю, що зростає. Для середньомасштабних, великомасштабних i глобальних PI3 рівень геомагнітної активності не впливає на залежність $L(A_d)$.

Дані отримано в радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (φ = 49.63°N, $\lambda = 36.32$ °E) в 1999—2010 рр. Використовувалося радіопросвічування іоносфери когерентними радіохвилями на частотах 150 і 400 МГц. Радіохвилі випромінювалися низькоорбітальними навігаційними ШСЗ серій «Парус» та «Цикада» з висотою кругової приполярної орбіти близько 1000 км.

З використанням глобальної прогностичної напівемпіричної моделі зародження і поширення АГХ-РІЗ пояснюється експериментальна залежність розміру горизонтального періоду РІЗ від їхньої відносної амплітуди (АГХ— акустико-гравітаційні хвилі).

Ключові слова: рухомі іоносферні збурення, горизонтальний просторовий період, відносна амплітуда, рівень сонячної активності, рівень магнітної активності, лінійна регресія.

Перелік скорочень

АГХ — акустико-гравітаційні хвилі ВП — вимірювальний пункт РІЗ — рухоме іоносферне збурення ШСЗ — штучний супутник Землі

1. ВСТУП

1.1. Параметри апаратури і теорія використаного радіофізичного ефекту. Експериментальні дослідження, наведені в роботі, ґрунтуються на радіопросвічуванні іоносфери когерентними радіохвилями з частотами f = 150 і 400 МГц, що випромінюються низькоорбітальними навігаційними ШСЗ серії «Парус» і «Цикада». Висота кругової біляполярної орбіти над поверхнею Землі у цих супутників становить близько 1000 км, нахил площини орбіти — 83°. На вимірювальному пункті (ВП) приймач когерентних радіохвиль виділяє (і реєструє) іоносферну складову $\delta f_i(t)$ допплерівського зміщення частоти для f = 150 МГц як функції часу t прольоту ШСЗ.

Цитування: Федоренко Ю. П. Залежність просторового періоду рухомих іоносферних збурень від їхньої відносної амплітуди. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 38—59. https://doi.org/10.15407/knit2020.06.038

Приймач також реєструє ефемериди, які передає бортовий передавач ШСЗ. Ефемериди — це координати і швидкості ШСЗ у дискретні моменти часу. Вони дозволяють визначати просторові положення радіопроменя ШСЗ — ВП в кожен момент прольоту супутника від радіосходу до радіозаходу.

Теорію (аналітичний вираз) іоносферної складової $\delta f_i(t)$ детально розглянуто в роботах [16— 18]. У роботі [3] показано, що для використовуваних несучих частот при зенітних кутах ШСЗ $\gamma < 70...75^{\circ}$ розрахунок $\delta f_i(t)$ можна здійснювати без врахування геомагнітного поля та іоносферної складової, пропорційної f^{-3} , та вважати, що обидві когерентні радіохвилі поширюються по випрямленому радіопроменю ШСЗ — ВП.

Тому на межах радіовидимості ШСЗ, коли $\gamma > 70...75^{\circ}$, фрагменти реєстрацій $\delta f_i(t)$ виключалися з розгляду, і розрахунок $\delta f_i(t)$ здійснювався за спрощеною залежністю:

$$\delta f_i(t) = \frac{a}{f} \frac{d}{dt} N_L \,, \tag{1}$$

де $a = e^2/(8\pi^2 c \varepsilon_0 m_e)$, N_L — кількість електронів у стовпі одиничного перерізу вздовж випрямленого радіопроменя (інтегральний вміст електронів уздовж похилого випрямленого радіопроменя),

$$N_L = \int_0^{R_B} N(R) dR$$

Тут N(R) — розподіл електронної концентрації N уздовж випрямленого радіопроменя R, R_B — похила дальність до ШСЗ.

Використаний нами спосіб апаратурного виділення $\delta f_i(t)$ по вимірах допплерівських зміщень двох когерентних радіохвиль, що випромінюються з борту ШСЗ, детально описано в роботі [3].

Наземний ВП розташовується на радіофізичній обсерваторії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна з географічними координатами $\varphi = 49.63^{\circ}$ N, $\lambda = 36.32^{\circ}$ Е. Він приймає сигнали, що випромінюються ШСЗ і вимірює величину $\delta f_i(t)$ протягом 12...16 хв кожні 1.5...2 год з апаратурною похибкою $\delta f = 0.005$ Гц. Реєстрація $\delta f_i(t)$ дозволяє досліджувати регулярні і збурені параметри просторового розподілу електронної концентрації *N* над

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

регіоном у діапазоні широт 33...66° N, що відповідає протяжності 3600 км на поверхні Землі. У ході окремого прольоту ШСЗ іоносферні параметри реєструються в широтному діапазоні в 24° (близько 2700 км) [2]. Рухомі іоносферні збурення, наявні в області радіопросвічування ШСЗ, проявляються на реєстраціях $\delta f_i(t)$ у вигляді часових варіацій, амплітуда яких в десятки і сотні разів більша за значення апаратурної похибки δf .

Мала апаратурна похибка ($\delta f = 0.005$ Гц) експериментальних даних $\delta f_i(t)$ дозволила нам виявити помилковість висновків окремих дослідників з приводу частоти появи РІЗ. Частота появи РІЗ — це відношення числа реєстрацій $\delta f_i(t)$ з проявами на них збурень іоносфери до загального числа зареєстрованих прольотів ШСЗ за вибраний період часу. При такому дослідженні короткі реєстрації $\delta f_i(t)$ з тривалістю менше З... 4 хв виключалися з розгляду.

1.2. Просторовий розподіл електронної концентрації. У заданий момент часу просторова модуляція *N* над ВП (над регіоном з горизонтальним радіусом до 1500 км) описується виразами

$$N = N_n [1 + A_d F(z) F_1(\phi, \lambda)], \qquad (2)$$
$$F(z) = \exp\left[-\frac{(z - z_m)^2}{H^2}\right],$$

 $F_1(\varphi, \lambda) = \sin[m_{\varphi}(\varphi - \Delta \varphi) + m_1(\lambda - \Delta \lambda) + \Phi],$

$$\Delta \varphi = \pm \frac{z - z_m}{R_E + z_m} \operatorname{tg} \xi,$$

$$\Delta \lambda = \pm \frac{z - z_m}{R_E + z_m} \operatorname{tg} \xi,$$

$$m_{\phi} = \frac{2\pi}{L} (R_E + z_m) \cos \alpha,$$

$$m_{\lambda} = \frac{2\pi}{L} (R_E + z_m) \sin \alpha,$$

$$\xi = \xi_0 - (\varphi - \varphi_0) k_{\varepsilon},$$

де H — півтовщина шару з неоднорідностями, z_n — висота розташування їхньої подовжньої осі, φ , λ — географічні широта та довгота вибраної точки поверхні відповідно, φ_0 — широта ВП, α — азимут хвильового вектора АГХ-РІЗ (відлічується від напрямку на північ), ξ_0 — кут нахилу фронту РІЗ у вертикальній площині при $\varphi = \varphi_0$, $A_d = A_0 - (\varphi - \varphi_0) k_{Ad}, N_n$ – незбурений просторовий розподіл електронної концентрації у заданий момент часу, який розрахований по глобальній адаптованій іоносферній моделі, А₀ — відносна амплітуда РІЗ при $\varphi = \varphi_0$, Ф — початковий зсув фази вибраного гармонійного збурення, $k_{Ad} = 0.006$ і $k_{\xi} = 0, k_{Ad}$ і k_{ξ} — коефіцієнти лінійної залежності, *z* — висота над поверхнею Землі. Знак у формулах для $\Delta \phi$ і $\Delta \lambda$ вибирається залежно від відносного положення джерела АГХ-РІЗ і ВП. Якщо джерело знаходиться північніше або західніше ВП, то вибирається знак «мінус». У інших випадках вибирається знак «плюс». Функції F(z) і $F_1(\varphi, \lambda)$ визначають зміни амплітуди і фази РІЗ залежно від z, ϕ і λ . Глобальна модель іоносфери коригується з використанням когерентних сигналів низькоорбітальних навігаційних супутників [14]. У результаті коригування для кожного прольоту ШСЗ розраховується ефективне число сонячних плям *W*, яке забезпечує найменше відхилення розрахункової (модельної, незбуреної) залежності від експериментальної реєстрації $\delta f(t)$.

1.3. Дослідження частоти появи рухомих іоносферних збурень. Ми встановили, що немає мінімумів і максимумів широтної, добової і сезонної частоти появи РІЗ. Виявилося, що частота появи РІЗ не залежить також від магнітної і сонячної активності [3]. Зупинимося на питаннях появи РІЗ дещо детальніше.

Нами було підтверджено, що максимум у широтній частоті появи середньомасштабних РІЗ дійсно спостерігається. Такий максимум виявляється у ряді досліджень [4, 10]. Проте це зовсім не означає, що РІЗ існують тільки в обмеженому діапазоні широт поблизу такого максимуму. Широтний максимум частоти появи обумовлений геометрією експерименту з радіопросвічування іоносфери і пояснюється нахилом ξ фронту РІЗ у вертикальній площині [5]. Уперше на природу цього ефекту вказується у роботі [10].

Якщо середньомасштабні РІЗ з помітним нахилом фронту у вертикальній площині ($\xi > 10...$ 20°) на висотах поблизу z_m F2 наявні по всьому прольоту ШСЗ з однаковим просторовим періодом *L* і амплітудою A_d , то їхні прояви на реєстрації $\delta f_i(t)$ будуть ясно спостерігатися тільки на тій частині прольоту, яка розташована далі від джерела РІЗ. На частині прольоту, що лежить ближче до джерела початкового збурення, амплітуда проявів РІЗ на експериментальних залежностях $\delta f_i(t)$ істотно зменшується, або збурення не виявляються зовсім.

У наших дослідженнях цей ефект використовувався для виявлення приблизного місця розташування джерела зародження PI3. Нахил фронту неоднорідностей у вертикальній плошині завжди спостерігається у напрямку переміщення іоносферних збурень. Тому цей ефект використовується для встановлення напрямку руху РІЗ (наприклад, до полюса або від полюса). Величина кута & нахилу середньомасштабних PIЗ у вертикальній площині визначається при розв'язуванні оберненої задачі з типовою похибкою $\delta \xi \approx \pm 5^\circ$. Для великомасштабних PI3 з просторовим періодом $L \sim 1000$ км значення $\delta \xi \approx$ $\approx \pm 30^{\circ}$, при L > 2000...3000 км у багатьох випадках можна визначити лише знак кута нахилу ξ. Таке велике збільшення похибки викликане геометрією експерименту [7].

Розглянемо тепер добову і сезонну частоту появи PI3. Наприклад, в роботах [10, 13] стверджується, що у нічний час середньомасштабні РІЗ спостерігаються значно рідше, а влітку відмічається мінімум частоти їхньої появи. З аналізу наших високоточних даних виявилось, що частота появи PI3 не має сезонних і добових екстремумів як при низькій, так і при високій сонячній активності. Ми вважаємо, що висновки згаданих досліджень зумовлені лише недостатньою апаратурною точністю вимірювань: було таке значення порогу N_m F2, нижче якого (N_m F2 = $2 \cdot 10^{11} \text{ ел} \cdot \text{м}^{-3}$) неможливо проводити вимірювання регулярних і збурених параметрів іонізації [11]. Слід зазначити, що таке припущення в обох роботах [10, 13] висловлювалося, проте все ж стверджувалося, що вказані ефекти мають місце.

Разом з тим в роботах [10, 13] отримано результати, які повністю збігаються з висновками наших досліджень [3, 11]: частота появи і амплітуда середньомасштабних РІЗ не залежать від стану магнітної активності. Це свідчить про те, що більшість РІЗ, викликаних високоширотними джерелами, не породжені авроральним електроджетом. Згідно з нашою гіпотезою основним високоширотним джерелом РІЗ є висипання енергійних протонів сонячного вітру у магнітосферні каспи Землі.

1.4. Розв'язування оберненої задачі. Зупинимося тепер детальніше на методиках визначення параметрів РІЗ за даними радіопросвічування іоносфери з борту низькоорбітальних навігаційних ШСЗ. З виразу (1) випливає, що у кожен момент часу значення $\delta f_i(t)$ визначається інтегральною залежністю N_L. Тому здається, що за допомогою трансіоносферного радіопросвічування, яке виконується тільки з одного ВП, можна отримати обмежені дані лише про середньомасштабні РІЗ. Адже тільки в цьому випадку при середньому прольоті ШСЗ над регіоном протяжністю 2000...3000 км на реєстрації $\delta f_i(t)$ може проявитися кілька квазіперіодів цугу РІЗ з горизонтальним масштабом 300...500 км. Параметри L і A_d таких PI3 однозначно обчислюються під час розв'язування оберненої радіофізичної задачі. Визначати ж з одного ВП просторовий період і амплітуду великомасштабних РІЗ, наприклад з горизонтальним масштабом від декількох тисяч до десятків тисяч кілометрів, вважається на перший погляд неможливим.

Задачу визначення параметрів середньомасштабних і великомасштабних РІЗ за вимірами $\delta f_i(t)$, виконаних лише в одному ВП, ми розв'язували поетапно. Передусім було розроблено методику коригування глобальної регулярної просторово-часової моделі N [9] за поточними експериментальними значеннями $\delta f_i(t)$. Ця методика для часу спостереження досліджуваного цугу PIЗ дозволяє визначати такі параметри глобальної незбуреної іоносфери: N_mF2, z_mF2 над ВП (або в довільній підіоносферній точці) і ефективне число сонячних плям W [14]. У цій методиці і наступних обчисленнях параметрів РІЗ припускається, що на час радіопросвічування іоносфери сигналами ШСЗ (12...16 хв) параметри (збуреного і незбуреного) середовища поширення радіохвиль залишаються незмінними (замороженими).

Далі з використанням просторової моделі збурених значень N (див. рівняння (2)) [2] проводилися чисельні розрахунки прямої радіофізичної задачі за проявом іоносферних неоднорідностей на розрахункових (модельних) залежностях $\delta f_i(t)$. Ці обчислення виконувалися з дискретним перебором в інтервалі можливих значень параметрів РІЗ (L, A_d, ξ, H — півтовщина шару з неоднорідностями, z_n — висота розташування їхньої поздовжньої осі). Потім з цього набору розрахункових залежностей відбиралася одна, найближча до досліджуваної експериментальної залежності $\delta f_i(t)$. Значення L, A_d, ξ, H у модельній залежності вважалися розв'язком оберненої задачі з визначення параметрів РІЗ.

У результаті таких досліджень, виконаних для серій реєстрацій, виявилось, що для середньомасштабних і великомасштабних неоднорідностей горизонтальна вісь РІЗ лежить приблизно на висоті $z_n = z_m F2$. Півтовщина шару з неоднорідностями для середньомасштабних PI3 дорівнює H = 25 км, дуже рідко H = 50 км [6]. Тому при визначенні інших параметрів середньомасштабних і великомасштабних РІЗ по окремій (вибраній) реєстрації $\delta f_i(t)$ завжди вважалося, що $z_n = z_m F2$, задавався напрям хвильового вектора збурень (за розташуванням точки старту ракети, місця вибуху, каспа, епіцентра землетрусу та ін. джерел точкових збурень), оцінювалося значення Н (H = 25 або 50 км), а потім в ході розв'язування оберненої задачі (із застосуванням методу перебору значень параметрів) обчислювалися величини L, ξ i A_d. Відмічаємо, що такі розрахунки здійснювалися з використанням заздалегідь обчислених значень H i z_m F2.

Обернена задача розв'язувалась шляхом порівняння експериментальних і ітераційних розрахункових значень $\delta f_i(t)$, отриманих при розв'язуванні прямої задачі для вірогідних діапазонів шуканих параметрів РІЗ. Розв'язування оберненої задачі закінчувалося при задовільному узгодженні (наближеному збігу) експериментальної і модельної залежностей $\delta f_i(t)$. Порядок пошуку значень параметрів РІЗ, як правило, був таким. Спочатку приблизно визначалося значення просторового періоду L і фази гармонічних іоносферних збурень на висоті N_m F2, заданих уздовж заздалегідь відомого азимута РІЗ. Далі перебором вірогідних значень приблизно визначалися A_d та ξ . Початкові значення L, A_d і ξ уточнюва-

лися у ході декількох ітерацій. Велика кількість розв'язків оберненої задачі і їхнє порівняння з експериментальними залежностями $\delta f_i(t)$ у збурених і незбурених умовах приведено в роботі [2].

Прояв на реєстраціях $\delta f_i(t)$ великомасштабних (ВН) РІЗ істотно інший, ніж середньомасштабних неоднорідностей. Тут замість квазігармонічної модуляції реєстрацій середньомасштабних збурень $\delta f_i(t)$ з'явилися абсолютно інші ефекти, зумовлені великомасштабними іоносферними збуреннями. Їх ми ретельно дослідили і використали для визначення параметрів великомасштабних РІЗ [6]. При цьому методологія розв'язування оберненої задачі, математична модель великомасштабних неоднорідностей залишилися такими ж, як і у випадку середньомасштабних РІЗ. При обчисленні параметрів великомасштабних РІЗ вважалося, що H = 80 км. Це значення H було отримано в роботі [6].

При одночасній появі на реєстраціях $\delta f_i(t)$ двох або навіть трьох РІЗ з різними значеннями L методика розв'язування оберненої задачі ускладнювалася. Спочатку визначалися параметри середньомасштабних PIЗ, а потім характеристики ВМ-неоднорідностей, далі виконувалася суперпозиція розрахованих збурень у вигляді модельної залежності $\delta f_i(t)$. Часто доводилося уточнювати попередній розрахунок параметрів великомасштабних і середньомасштабних РІЗ і знову здійснювати складання вичислених ефектів, що проявляються на розрахованій залежності $\delta f_i(t)$. Критерієм достовірності вичислених параметрів РІЗ був задовільний збіг модельних і експериментальних залежностей $\delta f_i(t)$. При цьому апаратурна похибка визначення параметрів РІЗ була настільки малою, що нею можна було завжди знехтувати, а методична похибка обчислення L и A_d не перевищувала 5...10 % для усіх масштабів РІЗ.

1.5. Зв'язок просторового періоду і амплітуди *PI3.* У ряді наших робіт відзначається пропорційна залежність експериментальних значень L і A_d [5—8]. У роботі [5] таку залежність (див. рис. 1) виявлено для екстремально великих значень A_d (далі — A_{dMax}). Експериментальні дані були зареєстровані в 1999, 2002, 2004 рр. при високій і середній сонячній активності, у діапазоні широт 40...50° N, у більшості випадків у денний час, зазвичай на південній частині залежності $\delta f_i(t)$. У ході всіх наших досліджень екстремально великі значення $A_{dMax} = 0.1...0.8$ спостерігалися не менше ніж у 10 % випадків. Такі A_{dMax} для середньомасштабних РІЗ відповідають найбільшим значенням L, які проявляються на вибраній експериментальній залежності $\delta f_i(t)$. У роботі [5] висловлено припущення про те, що зростаюча залежність $A_{dMax}(L)$ пояснюється виявленими для цих же реєстрацій $\delta f_i(t)$ широтними залежностями $A_{dMax}(\phi)$ і $L(\phi)$, значення яких (відповідно A_{dMax} і L) збільшуються із зменшенням широти місця розташування неоднорідності.

Слід підкреслити, що у більшості експериментів з трансіоносферного радіопросвічування виявлені РІЗ були породжені високоширотним точковим джерелом. Цей висновок було зроблено на основі таких даних. Згідно з теорією [12] (вона пояснює ефекти, які спостерігаються експериментально) у цугу РІЗ зі збільшенням відстані від джерела точкового збурення спостерігається майже лінійне збільшення відносної амплітуди A_d і просторового масштабу L. Отже, при віддаленні неоднорідності від місця точкового породження збурення повинна спостерігатися ймовірно лінійна зростаюча залежність $A_{dMax}(L)$ та $L(A_{dMax})$.

Наведемо й інше пояснення ефекту підвищення L зі зменшенням ϕ при породженні РІЗ високоширотним точковим імпульсним джерелом збурення. Згідно з численними експериментальними даними, отриманими після низьковисотних та висотних ядерних вибухів, швидкість поширення екстремумів цугу РІЗ описується спадною залежністю [2, 11]. Як відомо, горизонтальна довжина неоднорідності L визначається відстанню між суміжними максимами або суміжними мінімумами цугу АГХ-РІЗ. Якщо залежність швидкості екстремумів цугу спадна, то швидкість передньої межі неоднорідності завжди буде більшою за швидкість задньої межі. Це призводить до витягування (збільшення) горизонтального масштабу L при віддаленні (поширенні, переміщенні) неоднорідності від місця довільного точкового імпульсного збурення, зокрема й високоширотного. Таким чином, обговорюване збільшення L пояснюється різницею швидкостей переміщення передньої і задньої границь неоднорідності.

На рис. 1 з підвищенням L відбувається збільшення A_{dMax} . Розкид експериментальних значень відносно регресії $A_{dMax}(L)$ пояснюється тим, що експериментальні значення (кружки) стосуються істотно різних періодів спостережень, при яких касп перебував на різних відстанях від ВП.

Мета досліджень роботи полягає у вивченні експериментальної залежності $L(A_d)$ при різних рівнях геомагнітної та сонячної активності.

2. ОПИС БАЗИ ДАНИХ

У 1999—2010 рр. у Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна проводилися дослідження PIЗ у різних геліогеофізичних умовах. На основі цілодобових експериментів, виконаних у вказаний період в радіофізичній обсерваторії університету, отримано базу даних для параметрів 125 неоднорідностей. У табл. 1 приведено тільки ті параметри, які необхідні для виявлення залежності $L(A_d)$ і її можливого зв'язку з рівнями сонячної і магнітної активності: дата експерименту, час траверзу t_0 (як характеристика часу вимірювань параметрів іоносфери), горизонтальний просторовий період L PI3, відносна амплітуда А_д збурення електронної концентрації, ефективний індекс сонячної активності (число Вольфа *W*, яке визначалося розрахунком з використанням реєстрації $\delta f_i(t)$, планетарний індекс Кр геомагнітної активності, номер рисунка у роботі [2] з модельними і експериментальними залежностями $\delta f_i(t)$. Значення параметрів для 125 неоднорідностей визначалися у ході розв'язування оберненої радіофізичної задачі, заснованої на проявах РІЗ на реєстраціях $\delta f_i(t)$. Достовірність отриманого розв'язку для кожного трансіоносферного супутникового радіопросвічування підтверджується порівнянням модельної і експериментальної залежностей $\delta f_i(t)$, приведених у роботі [2].

Як відзначалося у вступі, квазіперіодичний цуг РІЗ зазвичай проявляється тільки на частині реєстрації $\delta f_i(t)$. Це зумовлено нахилом фронту середньомасштабних РІЗ у вертикальній площині, в результаті якого спостерігається широтний



Рис. 1. Залежність $A_{dMax}(L)$ і її регресія третього порядку [5]

ефект появи PI3. При розв'язуванні оберненої задачі цей квазіперіодичний фрагмент цугу ми замінювали гармонійним фрагментом, просторовий період якого був близький до середнього значення просторових періодів фрагмента цугу PI3. Для великомасштабних і глобальних PI3 при визначенні просторового періоду (з причини їхнього значного перевищення протяжності області радіопросвічування) застосовувалися лише гармонійні функції. Згідно з оцінками похибка визначення L і A_d становить 5...10 %.

Слід брати до уваги той факт, що часто на реєстраціях $\delta f_i(t)$ одночасно проявлялися РІЗ різних розмірів. При цьому іноді ми визначали параметри РІЗ не усіх розмірів. Тому в деяких випадках результати порівняння модельних і експериментальних залежностей $\delta f_i(t)$ були не завжди бездоганними.

База даних для нашої роботи взята з роботи [2]. У ній для кожної РІЗ-неоднорідності наведено просторовий горизонтальний період L, нормоване значення A_d амплітуди збурення електронної концентрації, кут нахилу ξ фронту збурення у вертикальній площині, висота розташування горизонтальної осі хвилеводу (висота z_m F2) і його півтовщина H.

Як відзначалося у вступі, в переважній більшості випадків джерело квазіхвильових збурень іоносфери перебувало у високих широтах. При

Дата експерименту	t ₀	<i>t</i> ₀ , год	<i>L</i> , км	A _d	W	Кр	<i>Kp</i> _n	Номер рисунка у роботі [2]
14.01.1999	12:23:44	12.3956	250	0.070	65	5+	5.33	18 а. б
14.01.1999	12:23:44	12.3956	415	0.230	65	5+	5.33	18 а, б
23.07.1999	14:30:49	14.5136	250	0.070	97	3-	2.67	18 в. г
23.07.1999	14:30:49	14.5136	415	0.130	97	3—	2.67	18 6, 2
31.07.2002	12:23:26	12.3906	400	0.050	148	2	2.00	24 а, б
31.07.2002	12:23:26	12.3906	200	0.015	148	2	2.00	24 а, б
31.07.2002	20:55:04	20.9178	400	0.100	148	3	3.00	25 а, б
31.07.2002	20:55:04	20.9178	800	0.350	148	3	3.00	25 а, б
31.07.2002	22:49:49	22.8303	800	0.500	148	2	2.00	27 а, б
31.07.2002	23:15:44	23.2622	320	0.200	148	2	2.00	25 в, г
31.07.2002	23:15:44	23.2622	1000	0.950	148	2	2.00	25 в, г
01.08.2002	0:36:29	0.6081	1700	0.600	137	1	1.00	29 а, б
01.08.2002	0:36:29	0.6081	5000	0.900	137	1	1.00	29 а, б
01.08.2002	11:06:15	11.1040	525	0.19	137	5+	5.33	35
01.08.2002	11:06:15	11.1042	650	0.180	137	3+	3.33	25∂, e
01.08.2002	11:06:15	11.1042	400	0.200	137	3+	3.33	25 d, e
01.08.2002	12:27:00	12.4500	2000	0.30	137	5+	5.33	35
01.08.2002	12:27:00	12.4500	325	0.04	137	5+	5.33	35
01.08.2002	12:27:12	12.4533	300	0.035	137	4	4.00	36 а, б
01.08.2002	12:27:12	12.4533	2000	0.300	137	4	4.00	36 а, б
01.08.2002	12:27:12	12.4533	350	0.050	137	4	4.00	36 а, б
01.08.2002	12:51:56	12.8656	150	0.025	137	4	4.00	36 в, г
01.08.2002	12:51:56	12.8656	2000	0.200	137	4	4.00	36 в, г
01.08.2002	12:51:58	12.8660	2000	0.20	137	5+	5.33	35
01.08.2002	12:51:58	12.8660	180	0.03	137	5+	5.33	35
01.08.2002	14:03:58	14.0661	400	0.090	137	4	4.00	37 а, б
01.08.2002	14:03:58	14.0661	3000	0.200	137	4	4.00	37 а, б
01.08.2002	14:04:12	14.0700	3000	0.20	137	5+	5.33	35
01.08.2002	14:04:12	14.0700	400	0.09	137	5+	5.33	35
01.08.2002	14:46:12	14.7700	4000	0.30	137	5+	5.33	35
01.08.2002	14:46:12	14.7700	350	0.03	137	5+	5.33	35
01.08.2002	14:46:15	14.7708	400	0.035	137	4	4.00	37 в, г
01.08.2002	14:46:15	14.7708	300	0.020	137	4	4.00	37 в, г
01.08.2002	14:46:15	14.7708	4000	0.300	137	4	4.00	37 в, г
01.08.2002	16:31:48	16.5300	3000	0.30	137	5+	5.33	35
01.08.2002	18:10:12	18.1700	3000	0.20	137	5+	5.33	35
01.08.2002	19:40:12	19.6700	3000	0.20	137	5+	5.33	35
01.08.2002	19:40:12	19.6700	300	0.05	137	5+	5.33	35
01.08.2002	20:11:05	20.1847	1200	0.35	137	5+	5.33	35
01.08.2002	21:58:12	21.9700	1500	0.20	137	5+	5.33	35
09.11.2004	10:44:47	10.7464	250	0.170	52	5	5.00	18 д, е
09.11.2004	10:44:47	10.7464	600	0.500	52	5	5.00	18 д, е
11.07.2009	22:34:45	22.5792	425	0.080	0	3	3.00	19 а, б

Таблиця 1. Параметри досліджених неоднорідностей і умови їхніх спостережень

Дата експерименту	t ₀	<i>t</i> ₀ , год	<i>L</i> , км	A _d	W	Кр	<i>Kp</i> _n	Номер рисунка у роботі [2]
30.09.2009	22:36:48	22.6133	2134	0.700	7	2+	2.33	23 а.б
30.09.2009	22:36:48	22.6133	350	0.200	7	2+	2.33	23 а. б
30.09.2009	23:06:12	23,1033	2134	0.600	2	2—	1.67	23 8.2
30.09.2009	23:06:12	23.1033	500	0.200	2	2—	1.67	23 <i>в</i> . г
01.10.2009	1:54:00	1.9000	2134	0.600	7	1+	1.33	23 ∂, e
01.10.2009	1:54:00	1.9000	500	0.300	7	1+	1.33	23 d, e
02.03.2010	0:25:31	0.4253	1600	0.20	24	2	2.00	33
02.03.2010	08:15:13	8.2536	18000	0.70	24	2	2.00	33
02.03.2010	08:15:13	8.2536	270	0.09	24	2	2.00	33
02.03.2010	10:00:04	10.0010	10000	0.70	24	2	2.00	33
02.03.2010	10:00:04	10.0010	250	0.06	24	2	2.00	33
02.03.2010	11:16:44	11.2790	5000	0.70	24	2	2.00	33
02.03.2010	11:16:44	11.2790	250	0.07	24	2	2.00	33
02.03.2010	11:16:46	11.2794	250	0.070	24	0	0.00	30 а, б
02.03.2010	13:01:59	13.0330	8000	0.35	24	2	2.00	33
02.03.2010	13:01:59	13.0330	250	0.06	24	2	2.00	33
02.03.2010	15:07:52	15.1310	5000	0.25	24	2	2.00	33
02.03.2010	15:07:52	15.1310	500	0.04	24	2	2.00	33
02.03.2010	16:52:05	16.8680	5000	0.32	24	2	2.00	33
02.03.2010	16:52:05	16.8680	280	0.03	24	2	2.00	33
02.03.2010	16:52:05	16.8681	280	0.025	24	2	2.00	30 в, г
02.03.2010	16:52:05	16.8681	5000	0.320	24	2	2.00	30 в, г
03.03.2010	0:51:31	0.8586	1300	0.500	24	2+	2.33	28 а, б
03.03.2010	0:51:32	0.8590	1800	0.50	23	2	2.00	33
03.03.2010	02:51:36	2.8600	1700	0.40	23	2	2.00	33
03.03.2010	4:34:48	4.5800	1550	0.40	23	2	2.00	33
03.03.2010	4:34:50	4.5806	1550	0.400	23	1+	1.33	40 <i>a</i> , б
03.03.2010	5:15:53	5.2647	1550	0.400	23	1+	1.33	40 в, г
03.03.2010	5:15:54	5.2650	1550	0.40	23	2	2.00	33
03.03.2010	08:42:47	8.7130	30000	0.90	23	2	2.00	33
03.03.2010	08:42:47	8.7130	300	0.02	23	2	2.00	33
03.03.2010	11:43:12	11.7200	5000	0.70	23	2	2.00	33
03.03.2010	11:43:12	11.7200	350	0.01	23	2	2.00	33
03.03.2010	11:43:13	11.7203	5000	0.700	23	1—	0.67	31 а, б
03.03.2010	11:43:13	11.7203	350	0.120	23	1—	0.67	31 а, б
03.03.2010	13:34:12	13.5700	5000	0.40	23	2	2.00	33
03.03.2010	13:34:12	13.5700	150	0.01	23	2	2.00	33
03.03.2010	17:03:53	17.0647	10000	0.400	23	2+	2.33	31 в, г
03.03.2010	17:03:53	17.0647	300	0.040	23	2+	2.33	31 в, г
03.03.2010	17:03:54	17.0650	15000	0.40	23	2	2.00	33
03.03.2010	17:03:54	17.0650	300	0.01	23	2	2.00	33
03.03.2010	19:34:48	19.5800	5000	1.00	23	2	2.00	33
03.03.2010	19:34:48	19.5800	225	0.02	23	2	2.00	33
03.03.2010	19:34:51	19.5808	500	1.000	23	3—	2.67	31 <i>0</i> , e

Продовження табл. 1

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

								закінчення таол. 1
Дата експерименту	t ₀	<i>t</i> ₀ , год	<i>L</i> , км	A _d	W	Кр	<i>Kp</i> _n	Номер рисунка у роботі [2]
03.03.2010	19:34:51	19.5808	350	0.060	23	3—	2.67	31 <i>д</i> , <i>е</i>
03.03.2010	19:34:51	19.5808	200	0.060	23	3—	2.67	31 <i>d</i> , <i>e</i>
04.03.2010	00:00:27	0.0075	75	0.01	25	3	3.00	34
04.03.2010	00:00:45	0.0125	0.0125	0.01	25	1—	0.67	34
04.03.2010	00:01:12	0.0200	0.02	0.02	25	1—	0.67	34
04.03.2010	00:01:30	0.0250	0.025	0.03	25	1-	0.67	34
04.03.2010	00:03:00	0.0500	0.05	0.05	25	3	3.00	34
04.03.2010	1:18:30	1.3083	2500	0.750	23	2+	2.33	28 в, г
04.03.2010	4:46:50	4.7806	2500	0.600	25	2	2.00	28 ∂, e
04.03.2010	5:29:59	5.4997	2500	0.600	25	2	2.00	28 ж, з
04.03.2010	5:30:00	5.5000	2500	0.60	25	1—	0.67	34
04.03.2010	07:24:58	7.4160	5000	0.62	25	1-	0.67	34
04.03.2010	09:10:30	9.1750	5000	0.60	25	1-	0.67	34
04.03.2010	10:23:24	10.3900	5000	0.70	25	1-	0.67	34
04.03.2010	12:09:32	12.1590	5000	0.50	25	3	3.00	34
04.03.2010	13:46:35	13.7764	210	0.080	25	1—	0.67	32 а, б
04.03.2010	13:46:35	13.7764	320	0.080	25	1—	0.67	32 а, б
04.03.2010	13:46:35	13.7764	5000	0.530	25	1—	0.67	32 а, б
04.03.2010	15:31:59	15.5330	35000	0.67	25	3	3.00	34
04.03.2010	15:31:59	15.5331	35000	0.670	25	2	2.00	32 в, г
04.03.2010	15:31:59	15.5331	150	0.100	25	2	2.00	32 в, г
04.03.2010	15:31:59	15.5331	240	0.100	25	2	2.00	32 в, г
04.03.2010	16:26:10	16.4360	2500	0.76	25	3	3.00	34
04.03.2010	18:16:42	18.2783	5000	1.000	25	2—	1.67	32 д, e
04.03.2010	20:02:15	20.0375	5000	1.000	25	2—	1.67	32 ж, е
04.03.2010	20:02:17	20.0380	5000	1.00	25	3	3.00	34
05.03.2010	01:44:24	1.7400	1300	0.30	18	0+	0.33	34
05.03.2010	03:14:53	3.2480	4000	1.00	18	0+	0.33	34
05.03.2010	03:59:46	3.9960	4000	1.00	18	0+	0.33	34
05.03.2010	04:58:52	4.9810	3000	0.80	18	0+	0.33	34
05.03.2010	09:37:23	9.6230	20000	1.00	18	1+	1.33	34
05.03.2010	09:37:23	9.6230	230	0.01	18	1+	1.33	34
05.03.2010	10:50:17	10.8380	30000	1.00	18	1+	1.33	34
05.03.2010	10:50:17	10.8380	230	0.02	18	1+	1.33	34
05.03.2010	12:35:35	12.5930	30000	1.00	18	1+	1.33	34
05.03.2010	12:35:35	12.5930	188	0.01	18	1+	1.33	34
05.03.2010	13:58:52	13.9810	30000	1.00	18	1+	1.33	34
05.03.2010	13:58:52	13.9810	233	0.01	18	1+	1.33	34

таких збуреннях вважалося, що хвильовий вектор PI3 спрямований уздовж географічного меридіана. При землетрусах і пусках важких ракет хвильовий вектор точкових збурень визначався азимутом «точкове джерело — ВП». Для кожної

неоднорідності на час її реєстрації вказано рівні геомагнітної (Kp) і сонячної (W) активності, незбурені значення основного максимуму електронної концентрації N_m F2 і висота z_m F2 його розташування над ВП. Ефективне значення W

n

для кожної реєстрації обчислювалося за методикою [14]. Наводяться також номери супутників серії «Парус» та «Цикада», дата, часовий інтервал прольоту ШСЗ, час траверзу t_0 (московський декретний час) і зенітний кут на траверзі g_0 .

3. АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ

У період досліджень 14.01.1999—05.03.2010 параметри, що вивчаються, лежали у таких границях: L = 100...35000 км, $A_d = 0.005...1$, W = 0...148, Kp = 0...5+.

На рис. 2, *а* показано залежність $L(A_d)$, отриману для усіх масштабів РІЗ (кружки), і її апроксимацію поліномом другого степеня (суцільна лінія) з коефіцієнтами: $b_0 = 65.8 \text{ км}, b_1 = 545.1 \text{ км}, b_2 = 7998.5 \text{ км}$. Коефіцієнт кореляції даних r = 0.35. Штриховими лініями вказано довірчі інтервали 95 % і врізка зі збільшеним масштабом для малих значень L і A_d . Коефіцієнт кореляції даних в наведеній регресії другого порядку незначно відрізняється від коефіцієнта кореляції лінійної регресії r = 0.34. Тому далі будемо аналізувати тільки лінійні регресії експериментальних даних $L(A_d)$.

На рис. 2, б приведено лінійні регресії залежності $L(A_d)$ для усіх масштабів РІЗ і їхні апроксимації лінійною регресією для низьких $W_1 = 0...25$ (точки), середніх і високих $W_2 = 52...148$ (квадратики) рівнів сонячної активності. Для даних W_1 отримано значення $b_0 = -752.2$ км, $b_1 = 13984.5$ км, r = 0.33; для даних W_2 — значення $b_0 = 584.7$ км, $b_1 = 2949.1$ км, r = 0.24. Тангенси кутів нахилу лінійної регресії для даних W_1 та W_2 відрізняються у 4.7 раза. Довірчі інтервали 95 % для даних W_1 і W_2 при L = 1000...35000 км не перекриваються. Це свідчить про те, що для діапазону L = 1000...35000 км лінійні регресії $L(A_d)$ при низькому і високому рівнях сонячної активності суттєво різні.

На рис. 2, *в* приведено лінійні регресії залежності $L(A_d)$ усіх масштабів для низьких ($Kp_1 = 0...3$) і середніх ($Kp_2 = 3...5+$) рівнів геомагнітної активності. Для даних Kp_1 отримано коефіцієнти $b_0 = -752.2$ км, $b_1 = 13984.5$ км, r = 0.38; для даних Kp_2 — значення $b_0 = -167.4$ км, $b_1 = 10336.4$ км, r = 0.23. Згідно з розрахунками довірчні інтервали 95 % регресії для даних Kp_1 і Kp_2



Рис. 2. a — залежність $L(A_d)$ для усіх масштабів РІЗ, δ — лінійні регресії залежності $L(A_d)$ усіх масштабів для рівнів сонячної активності $W_1 = 0...25$ (кружки) і $W_2 = 52...148$ (квадратики), ϵ — лінійні регресії залежності $L(A_d)$ усіх масштабів для рівнів геомагнітної активності $Kp_1 = 0...3$ — (кружки) і $Kp_2 = 3...5$ + (квадратики)



Рис. 3. a — залежність $L(A_d)$ для середньомасштабних РІЗ, δ — залежність $L(A_d)$ для середньомасштабних РІЗ при низьких W_1 (кружки), середніх і високих W_2 (квадратики) рівнів сонячної активності, e — залежність $L(A_d)$ для середньомасштабних РІЗ при низьких Kp_1 (кружки) і середніх Kp_2 (квадратики) рівнів геомагнітної активності

практично перекриваються, тому немає підстав вважати, що залежність $L(A_d)$ поводиться порізному для великих і малих рівнів геомагнітної активності.

З рис. 2, б і в для малих і великих рівнів сонячної активності, малих і середніх рівнів геомагнітної активності виявляється, що $L(A_d)$ є зростаючою залежністю. Проте для різних діапазонів L значення коефіцієнта лінійної регресії b_1 можуть виявитися суттєво різними. Тому нижче залежність $L(A_d)$ досліджено окремо для трьох видів РІЗ: середньомасштабних (100...800 км), великомасштабних (1000...4000 км) і глобальних (5000...35000 км).

На рис. 3, *а* для середньомасштабних РІЗ наведено експериментальні значення залежності $L(A_d)$ (квадратики) і їхня лінійна регресія з довірчими інтервалами 95 %. Отримано такі значення коефіцієнтів лінійної регресії: $b_0 = 229.1$ км, $b_1 = 1036.2$ км і коефіцієнт кореляції даних r == 0.59. Значення A_d для середньомасштабних РІЗ змінювалися у діапазоні 0.005...0.5.

Для середньомасштабних PI3 збільшення *L* при збільшенні *A*_d вперше було виявлено у роботі [5] (детальніше див. п. 1.4). Зазначимо, що у згаданій роботі застосовувалася дещо інша методика обробки і аналізу експериментальних даних.

На рис. 3, δ показано дві експериментальні залежності $L(A_d)$ для середньомасштабних РІЗ: окремо для низьких значень $W_1 = 0...25$ (кружки) і для високих значень сонячної активності $W_2 = 52...148$ (квадратики). Коефіцієнти апроксимації даних для вказаних інтервалів W мають такі значення:

• для даних W_1 : $b_0 = 222.1$ км, $b_1 = 891.6$ км, r = 0.33,

• для даних W_2 : $b_0 = 259.6$ км, $b_1 = 981.6$ км, r = 0.64.

Як бачимо, у регресіях для масивів W_1 , W_2 коефіцієнти b_0 і b_1 приблизно однакові. Кожний графік регресій наведених на рис. 3, δ , фактично лежить в області перекриття довірчих інтервалів. Тому з проведеного аналізу можна зробити висновок про те, що експериментальна залежність $L(A_d)$ для середньомасштабних РІЗ задовільно апроксимується лінійною регресією і не залежить від рівня сонячної активності. Для дослідження можливого впливу на залежність $L(A_d)$ рівнів геомагнітної активності масив L для середньомасштабних РІЗ розділений на дві частини (див. рис. 3, *в*): $Kp_1 = 0...3$ — (кружки) і $Kp_2 = 3...5$ + (квадратики). Значення відповідних коефіцієнтів апроксимації для вказаних інтервалів Kp такі:

- для *Кр*₁: *b*₀ = 216.5 км, *b*₁ = 1009.9 км, *r* = 0.62,
- для *Кp*₂: $\vec{b_0}$ = 259.4 км, $\vec{b_1}$ = 991.4 км, r = 0.54.

На рис. 3, в коефіцієнти регресії для даних Kp_1 і Kp_2 майже збігаються, їхні графіки лежать в області перекриття 95 %-х довірчих інтервалів. Відповідні коефіцієнти лінійної регресії на рис. 2, б і 3, б відрізняються несуттєво. Це свідчить про те, що для середньомасштабних РІЗ в наших дослідженнях рівні сонячної і геомагнітної активності не чинили впливу на лінійну залежність $L(A_d)$.

Залежність $L(A_d)$ для великомасштабних РІЗ при W = 2...148 і Kp = 3-...5+ показано на рис. 4, *a*. Тут коефіцієнти апроксимації мають значення: $b_0 = 1855.3$ км, $b_1 = 957.1$ км, r = 0.08. Низький коефіцієнт кореляції лінійної регресії свідчить про те, що лінійна регресія $L(A_d)$, побудована по усіх вимірах великомасштабних РІЗ, недостовірна.

Тому для пошуку можливої залежності $L(A_d)$ дані для великомасштабних РІЗ були розбиті на дві частини по значеннях рівнів сонячної активності: для $W_1 = 2...25$ і $W_2 = 137...148$. На рис. 4, δ видно, що дані для низьких (кружки) і високих (квадратики) рівнів сонячної активності апроксимуються лінійною регресією відповідно зростаючою і спадною регресіями з коефіцієнтами:

• для даних W_1 : $b_0 = 219.5$ км, $b_1 = 3448.8$ км, r = 0.87,

• для даних W_2 : $b_0 = 3121.8$ км, $b_1 = -2172.7$ км, r = 0.22.

Таким чином, достовірним є висновок про те, що для великомасштабних РІЗ рівень сонячної активності істотно впливає на вигляд лінійній регресії даних $L(A_d)$: для низьких рівнів сонячної активності лінійна регресія зростаюча, а при високих — спадна.

Лінійні регресії, побудовані окремо для низьких і високих рівнів геомагнітної активності, також виявилися зростаючою і спадною відповідно (рис. 4, *в*). Коефіцієнти апроксимації дорівнюють:



Рис. 4. a — залежність $L(A_d)$ для великомасштабних PI3, δ — залежність $L(A_d)$ для великомасштабних PI3 при низькій W_1 (кружки) і високій W_2 (квадратики) рівнях сонячної активності, ϵ — залежність $L(A_d)$ для великомасштабних PI3 при низькій Kp_1 (кружки) і середніх Kp_2 (квадратики) рівнях геомагнітної активності



Рис. 5. Залежність $L(A_d)$ для глобальних РІЗ при низьких рівнях сонячної активності W = 18...25 і рівнях геомагнітної активності Kp = 1-...3 (кружки). Квадратик — значення $L(A_d)$ для глобальних РІЗ при високому рівні сонячної активності W = 137 і низькому рівні геомагнітної активності Kp = 1

• для *Кр*₁ = 0+...2+: *b*₀ = 501.8 км, *b*₁ = 2793.1 км, *r* = 0.56,

• для $Kp_2 = 3...5+: b_0 = 2635.3$ км, $b_1 = -173.0$ км, r = 0.0009.

Для середніх рівнів геомагнітної активності апроксимація експериментальних даних виявилася недостовірною. Слід взяти до уваги, що для переважного числа досліджуваних неоднорідностей низькі рівні геомагнітної активності ($Kp_1 = 0...3-$) спостерігалися при низьких рівнях сонячної активності ($W_1 = 2...25$). Тільки у чотирьох неоднорідностей з Kp = 2 значення їхніх рівнів сонячної активності є дуже високим W = 148 (максимальне значення в наших дослідженнях). Така реалізація зв'язку рівнів магнітної і сонячною активності призвела до того, що для $Kp_1 = 0 + ... + 2 + 3$ начення коефіцієнтів регресії *b*₀ = 501.8 км, *b*₁ = 2793.1 км виявилися близькими до значень коефіцієнтів регресії для даних W_1 , а саме: $b_0 = 219.5$ км, $b_1 = 3448.8$ км. Проте коефіцієнт кореляції при цьому зменшився з r = 0.87(див. значення r для $W_1 = 2...25$) до r = 0.56 ($Kp_1 =$ =0+...2+). Швидше за все, лінійний зв'язок $L(A_d)$ від рівня геомагнітної активності практично не залежить, а отримані на рис. 4, в графіки зумовлені тим, що неможливо «відключити» сонячну активність при дослідженні впливу геомагнітної активності і навпаки. На користь достовірності цього висновку свідчить також і те, що для усіх масштабів РІЗ залежність від геомагнітної активності не було виявлено (див. рис. 2, e). Ми відмічаємо, що достовірність зробленого нами висновку про незалежність лінійного зв'язку $L(A_d)$ від рівня геомагнітної активності, мабуть, не порушується у зв'язку з наявністю деякої невизначеності, зумовленої недостатньо великим масивом даних для великомасштабних РІЗ.

На рис. 5 показано графік лінійної регресії і її 95 % довірчі інтервали для глобальних РІЗ при низьких рівнях сонячної активності (W = 18...25) і геомагнітної активності Kp = 1...3. Лише одна неоднорідність отримана при високому рівні сонячної активності (W = 137) і низькому рівні геомагнітної активності (Kp = 1). Коефіцієнти лінійної апроксимації даних $L(A_d)$ при W = 18...25 дорівнюють: b_0 = 518.6 км, b_1 = 17397.5 км, r = 0.16.

На рис. 6, a-в наведено відповідно динаміку добової зміни відносної, абсолютної амплітуд неоднорідності і добового ходу N_m F2, які спостерігалися протягом 13 годин 04.03.2010 при низькому рівні сонячної активності. Як видно, абсолютне значення амплітуди ΔN неоднорідності фактично повторює добовий хід N_m F2.

Великомасштабні і глобальні РІЗ в основному виявлено при низьких рівнях сонячної і геомагнітної активності. Згідно з нашими спостереженнями, час життя великомасштабних і глобальних РІЗ при низьких рівнях сонячної активності часто становить більше десяти годин, а при високій сонячній активності — у декілька разів менше. Тому прольоти ШСЗ з інтервалами 1...2 год істотно рідше діагностували великомасштабні і глобальні РІЗ при високій сонячній активності Дативності. Коефіцієнт лінійної регресії b_1 (тангенс кута нахилу лінійної апроксимації) даних $L(A_d)$ для великомасштабних і глобальних РІЗ відповідно у 4 і 20 разів більший, ніж для середньомасштабних РІЗ.

4. КОРОТКИЙ ОПИС МОДЕЛІ АГХ-РІЗ

Породження і поширення РІЗ описується глобальною прогностичною напівемпіричною мо-



Рис. 6. *а* — добова зміна A_d в період спостереження глобальних РІЗ з L = 5000 км, залежність отримана 04.03.2010 при W = 25, δ — добова зміна абсолютного значення електронної концентрації неоднорідності $\Delta N = A_d N_m$ F2 в період спостереження глобальних РІЗ з L = 5000 км, залежність отримана 04.03.2010 р. при W = 25, e — добовий хід N_m F2 в період спостереження глобальних РІЗ з L = 5000 км, залежність отримана 04.03.2010 р. при W = 25, e — добовий хід N_m F2 в період спостереження глобальних РІЗ з L = 5000 км, залежність отримана 04.03.2010 при W = 25

деллю АГХ-РІЗ [11]. У джерелі точкового збурення в результаті імпульсної дії відбуваються вільні власні коливання щільності атмосфери. Точковим імпульсним джерелом можуть бути висипання у магнітосферний касп енергійних частинок сонячного вітру, сплеск електроджету (електроструменя), землетрус, вибух вулкану, старт важкої ракети, промисловий вибух, ядерний вибух в атмосфері і космосі. У моделі вважається, що АГХ-РІЗ від вказаних джерел поширюються в атмосферному хвилеводі уздовж поверхні Землі на висотах F2-області іоносфери. Дана модель далі також іменуватиметься моделлю точкового імпульсного збурення.

Джерело (далі атмосферний генератор) у ході коливань щільності атмосфери з півперіодом $\tau_0 = 3.95$ хв випромінює цуг АГХ-РІЗ, швидкість поширення фрагментів якого зменшується зі збільшенням часової затримки від моменту початку таких коливань. Швидкості V_i поширення 16 екстремумів цугу АГХ (мінімумів і максимумів) приведено у табл. 2. Швидкості поширення інших фрагментів (фаз коливань атмосферного генератора), наприклад точок переходу через нульові рівні цугу, визначаються з використанням кусочно-кубічної ермітової інтерполяції [1]. Вказані швидкості поширення екстремумів (і інших фрагментів цугу) незмінні по шляху горизонтального переміщення АГХ-РІЗ. Вказані закономірності спочатку були виявлені експериментально [15], а потім інтерпретовані теоретично [11]. У роботі [11] передбачається, що відносні амплітуди A_i екстремумів цугу, наведені у табл. 2, як і швидкості V_i , не змінюють своїх значень уздовж усього шляху поширення збурення.

Через великі відмінності значень швидкостей поширення V_i суміжних початкових екстремумів у цугу АГХ основні просторові півперіоди l_i належать великомасштабним та глобальним неоднорідностям. Так, наприклад, протягом інтервалу часу *delta* = 10 хв = 600 с після «включення» атмосферного генератора породжується перший просторовий півперіод l_i , який стосується глобальних АГХ:

$$l_1 = (V_0 - V_1) delta =$$

= (11.3 км/с - 3 км/с) · 600 с = 4980 км.

Швидкість поширення середини цього півперіоду, що безперервно розширюється, є постійною:

$$V_{l1} = (V_0 + V_1)/2 =$$

= (11.3 km/c + 3 km/c)/2 = 7.15 km/c.

Відстань середини даного півперіоду від джерела збурення дорівнює

 $S = V_{I1} delta = 7.15 \text{ km/c} \cdot 600 \text{ c} = 4290 \text{ km}.$

Далі для спрощення викладу обговорюваної моделі вважається, що у будь-який вибраний

. Екстремуми		V. male	A _i	4				
и цугу	<i>v_i</i> , км/с	A _{dli}		<i>del</i> = 0.5 год	<i>del</i> = 3 год	<i>del</i> = 6 год		
0	Min	11.3155	0.48	0.655	21049.1	95888.6	185696.0	
1	Max	3	0.83	0.9	6583	23197.9	43135.7	
2	Min	1.1539	0.97	0.985	2442.2	6689.3	11785.9	
3	Max	0.682	1	0.975	1479.6	3398.4	5700.9	
4	Min	0.4688	0.95	0.915	987.5	1992.8	3199.1	
5	Max	0.3571	0.88	0.84	818.2	1504.0	2326.9	
6	Min	0.2809	0.8	0.75	553.5	938.7	1400.9	
7	Max	0.2381	0.7	0.675	558.3	901.3	1312.7	
8	Min	0.2	0.65	0.6	418	639.5	905.0	
9	Max	0.1754	0.55	0.52	323.7	475.9	658.3	
10	Min	0.1585	0.49	0.45	350.3	503.3	686.9	
11	Max	0.1415	0.41	0.38	383	536.0	719.6	
12	Min	0.1245	0.35	0.32	424	576.1	758.6	
13	Max	0.1076	0.29	0.27	486.2	639.2	822.8	
14	Min	0.0906	0.25	0.235	573.2	726.2	909.8	
15	Max	0.0736	0.22					
1		1	1	1	1	1		

Таблиця 2. Просторові квазіпівперіоди І_і для різних значень del, отримані по параметрах глобальної напівемпіричної моделі АГХ-РІЗ

момент часу відносні збурення в АГХ та РІЗ збігаються. Таке допущення правомірне, коли хвильовий вектор АГХ утворює кут а з площиною магнітного меридіана, що не перевищує 40°. У моделі точкового імпульсного збурення [11] є емпіричне співвідношення, яке дозволяє обчислити амплітуду РІЗ для довільного кута α.

5. ПОШУК ТЕОРЕТИЧНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПЕРІОДУ ВІД АМПЛІТУДИ АГХ-РІЗ

5.1. *Теоретичний розгляд.* Як видно з табл. 2, модельні початкові суміжні значення швидкостей V_i дуже різні (тут i — номер екстремуму, del — час життя неоднорідностей, який задається). Це призводить до того, що навіть сусідні просторові півперіоди помітно відрізняються один від одного. Тому нижче вони іменуються не півперіодами, а квазіпівперіодами. Далі для більш детального теоретичного аналізу розглядаються не просторові періоди, а просторові квазіпівперіоди.

Для обчислення значення просторового квазіпівперіоду заданого номера (у цугу АГХ), що переміщається над ВП, який розташований на відстані *R* від атмосферного генератора, спочатку обчислимо тривалість часового квазіпівперіоду з тим же номером у цугу АГХ, що і просторовий квазіпівперіод, який розглядається. Тривалість часового квазіпівперіоду з номером і характеризує його час життя над ВП, оскільки на зміну поточного квазіпівперіоду з номером і з'явиться квазіпівперіод з номером (i+1). Квазіпівперіод з номером (*i*+1) буде заміщений квазіпівперіодом з номером (*i*+2) і так далі. Такі події зазвичай мають місце при високій сонячній активності. При цьому не спостерігається накладення коливань, наприклад z_m F2 (або N_m F2) різних періодів, що проявилися в різні інтервали часу. Тому наше припущення допустиме, воно не суперечить експериментальним даним.

Для обчислення довжини просторового горизонтального квазіпівперіоду, який розміщується над ВП, знайдено добуток тривалості часового квазіпівперіоду з номером *i* на швидкість поширення просторового квазіпівперіоду з цим же номером. Для цього отримаємо спочатку залежність тривалості часових квазіпівперіодів цугу АГХ-РІЗ від часової затримки їхніх спостережень над ВП $\tau_i(t)$. Тут затримка *t* відлічується від моменту збудження атмосферного генератора до спостереження середини тривалості вибраного квазіпівперіоду.

Як вже відзначалося, у джерелі початкового збурення відбуваються коливання шільності повітря з постійним періодом $T = 2\tau_0 = 7.9$ хв, де півперіод $\tau_0 = 3.95$ хв. Час спостереження t_0 початкового (нульового) екстремуму (мінімуму, *onset*) над ВП, розташованого на відстані *R* від джерела, визначається очевидним виразом:

$$t_0 = R/V_0.$$
 (3)

Тут V_0 — швидкість поширення нульового екстремуму (початкового мінімуму).

Кожен наступний екстремум хвилі збурення спостерігається із затримкою τ_0 . Тому час t_i приходу до ВП довільних екстремумів цугу АГХ-РІЗ обчислюється за формулою

$$t_i = R/V_i + i\tau_0,$$
(4)
 $i = 0, 1, 2, ..., 15,$

де V_i — швидкість поширення *i*-го екстремуму.

Різниця часів приходу суміжних екстремумів цугу АГХ-РІЗ визначає тривалість квазіпівперіодів т_i:

$$\tau_i = t_i - t_{i-1} = \tau_0 + R(1/V_i - 1/V_{i-1}), \quad (5)$$

$$i = 1, 2, ..., 15.$$

Час $t_{i\ m}$ спостереження середини часового квазіпівперіоду, який визначається по екстремумах цугу, обчислюється за формулами:

$$t_{1m} = (t_0 + t_1) / 2 = (R / V_0 + R / V_1 + \tau_0) / 2, \quad (6)$$

$$t_{im} = (t_{i-1} + t_i)/2 =$$

$$= [R(1/V_{i-1} + 1/V_i) + (2i - 1)\tau_0]/2,$$

$$i = 2, 3, ..., 15.$$
(7)

Тут i — номер екстремуму в цугу АГХ-РІЗ.

Залежності $\tau_i(t_{i\ m})$ тривалості часового квазіпівперіоду від часу (спостереження його середини), що пройшов після запуску атмосферного генератора, для R = 2500, 4500 і 6500 км показано на рис. 7. Розрахункову залежність $\tau_i(t_{i\ m})$ представлено у вигляді графіка $\tau(t)$ без вказівки індексів біля змінних. Криві розраховано по формулах (5)—(7).



Рис. 7. Залежності τ (*t*) для трьох значень *R*

Нагадуємо, що швидкості екстремумів V_i спадають зі зростанням їхнього номера в цугу АГХ-РІЗ (див. табл. 2) і не змінюються по усьому шляху поширення. Тому швидкість переміщення кожного просторового квазіпівперіоду (у цугу АГХ-РІЗ) буде постійною для ВП з довільним значенням *R*. Ця швидкість визначається залежністю

$$V_{im} = (V_{i-1} + V_i) / 2, \tag{8}$$

$$i = 1, 2, 3, ..., 15.$$

Значення просторового квазіпівперіоду l_i над ВП, розташованого на відстані R від джерела, обчислюється за очевидною формулою

$$l_i = V_{im} \tau_i , \qquad (9)$$

де τ_i і V_{im} визначаються залежностями (5) і (8).

Кожне значення l_i характеризується відносною амплітудою A_{d1i} :

$$A_{d1i} = (A_{i-1} + A_i) / 2,$$
(10)

$$i = 1, 2, 3, ..., 15.$$

Значення *А*_{*d1i*} наведено у табл. 2 (5-та графа).

Розраховані залежності l_i (A_{dli}) для трьох значень R показано на рис. 8, де на графіку тут і

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6



Рис. 8. Залежність горизонтальних квазіпівперіодів *l* від відносної амплітуди A_{d1} для R = 2500, 4500 та 6500 км. На графіку $A_{d1}(l)$ не наводиться індекс *i* у змінних *l* та A_{d1}

нижче індекс *i* не вказано. На кожній із залежностей спостерігається кінцевий лінійний спадний фрагмент залежності. Максимальні значення цього фрагменту *l* різко збільшуються зі збільшенням *R*.

5.2. Порівняння модельних і експериментальних значень. У розд. З досліджувались залежності горизонтальних розмірів РІЗ від їхньої відносної амплітуди. Дослідження проведені протягом одинадцятирічного періоду. У цей період відстань між місцем початкового збурення (каспом) і ВП (радіофізична обсерваторія Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, $\varphi = 49.63^{\circ}$ N, $\lambda = 36.32^{\circ}$ E) була різною. Згідно з оцінками у середньому вона становила не більш ніж R = 2500 км. Тому подальші розрахунки виконаємо тільки для нижньої кривої, що показана на рис. 8.

Спадний фрагмент залежності при $(A_{d1}) \ge 0.9$ відповідає великомасштабним АГХ, він розташований у діапазоні півперіодів l = 2000...4000 км, що для просторових періодів приблизно відповідає діапазону L = 4000...8000 км. Для вказаних умов коефіцієнт лінійної регресії виявився рівним $b_1 = -31852$. Спадна залежність $L(A_d)$ експериментально спостерігалася тільки при високій сонячній активності (W = 137...148) з коефіцієнтом лінійної регресії $b_1 = -2173$ (див. рис. 4, δ), що якісно узгоджується з наведеною вище теоретичною оцінкою. Розкид експериментальних значень $L(A_d)$ відносно їхньої лінійної регресії пояснюється різними значеннями R, що мали місце у ході проведених багаторічних спостережень. При високій сонячній активності реєструвалися PI3, час життя яких для R == 2500 км визначався тривалістю квазіперіоду 0.5...1 год. Тривалість будь-якого квазіперіоду модельного цугу АГХ оцінено з використанням рис. 7, на якому ілюструється часова динаміка тривалості квазіпівперіоду. Квазіперіод приблизно визначається подвоєним квазіпівперіодом (див. лінійні ділянки залежності $\tau(t)$ на рис. 7).

5.3. Обчислення довжини очікуваного квазіпівперіоду при низькій сонячній активності. У розд. 3 на основі експериментальних досліджень відзначалося, що час життя РІЗ на висоті z_m F2 в роки низької сонячної активності може становити близько 13 год. Таке збільшення часу життя неоднорідностей призводить до істотного розширення довжини квазіпівперіоду l_i . В цьому випадку довгоживучий квазіпівперіод може виявлятися в ході послідовних 3—7 прольотів ШСЗ (див. рис. 6, δ).

У роки мінімуму сонячної активності значення просторового півперіоду l_i можна приблизно описати виразом

$$l_i = 0.5\tau_i (V_i + V_{i+1}) + (V_i - V_{i+1})del, \qquad (11)$$

де del — час життя квазіпівперіоду l_i , який задається при низькій сонячній активності. Перший доданок в (11) є мінімальною частиною довжини квазіпівперіоду, вона визначається співвідношенням (9). Така довжина квазіпівперіоду може спостерігатися при високій сонячній активності, коли час життя l_i є мінімальним. Другий до-

l. км

12000

данок в (11) — це приріст довжини квазіпівперіоду l_i за рахунок збільшення його часу життя *del*. Співмножник ($V_i - V_{i+1}$) другого додатку виразу (11) — це швидкість розширення, зумовлена відмінністю суміжних значень V_i . Найбільша різниця значень $V_i - для$ п'яти перших суміжних екстремумів цугу (див. табл. 2). Тому співвідношення (11) прогнозує найбільші прирости, викликані затримкою *del*, для декількох початкових суміжних екстремумів. Для V_i в діапазоні від i = 6 до i = 14 спостерігаються невеликі прирости l_i , оскільки суміжні значення V_i для цих екстремумів цугу мало відрізняються одне від одного (див. табл. 2).

Розрахунок залежності $l(A_{d1})$ для R = 2500 км і різних значень *del* (0.5, 3 і 6 год) для середньомасштабних, великомасштабних і глобальних РІЗ наведено на рис. 9. Тут останні фрагменти залежності для великомасштабних і глобальних РІЗ не спадають, як при високій сонячній активності, а зростають. За даними цього рисунка розраховано лінійні регресії для різних значень *del* (0.5, 3 і 6 год), середньомасштабних, великомасштабних і глобальних РІЗ. Результати обчислень ілюструються на рис. 10.

Розрахункові значення b_1 для ряду затримок del у середньомасштабних (СМ), великомасштабних (ВМ) і глобальних (ГМ) РІЗ і частки b_{1BM}/b_{1CM} , $b_{1\Gamma M}/b_{1CM}$ для ряду затримок del наводяться в табл. 3. Експериментальні значення b_{1BM}/b_{1CM} і $b_{1\Gamma M}/b_{1CM}$ дорівнюють (див. розд. 3):

$$b_{1BM}/b_{1CM} = 4,$$

 $b_{1\Gamma M}/b_{1CM} = 20.$

Таблиця 3. Розрахункові значення b₁ для різних затримок *del* в середньомасштабних, великомасштабних і глобальних PI3

Вид РІЗ	del, год	b_1	b_{1BM}/b_{1CM}	$b_{1\Gamma M}/b_{1CM}$
Середньо- масштабні (СМ) РІЗ	0.5 3 6	62 493 1010		
Велико- масштабні (ВМ) РІЗ	0.5 3 6	2258 6518 11630	36 13 12	
Глобальні (ГМ) РІЗ	0.5 3 6	96270 329099 608496		1553 667 602



Рис. 9. Залежність $l(A_{d1})$ для R = 2500 км і різних значень del = 0.5 год (точки), 3 год (квадратики), 6 год (трикутники) середньомасштабних, великомасштабних і глобальних РІЗ



Рис. 10. Залежність лінійної регресії для $l(A_{d1})$ при R = 2500 км і різних значень del = 0.5 год (точки), 3 год (квадратики), 6 год (трикутники) середньомасштабних, великомасштабних і глобальних РІЗ



Рис. 11. Висотна залежність щільності *s* атмосфери при різних рівнях сонячної активності: 1 — низький, 2 — середній, 3 — високий, 4 — високий (сплески). Графік узято з документа ECSS-E-ST-10-04С «Європейській кооперації по стандартизації в області космічної техніки». https://chipinfo.pro/infos/physics/ atmospheic_density, https://habr.com/ ru/post/410861

Експериментальні результати та оцінки, отримані в рамках моделей, для низької сонячної активності узгоджуються задовільно. Спостерігається різке зростання нахилу лінійної регресії для середньомасштабних, великомасштабних та глобальних PI3. Оцінки свідчать про те, що тривалість життя великомасштабних і глобальних PI3 може істотно перевищувати 6 год, що підтверджено експериментально у розд. 3.

6. ОБГОВОРЕННЯ

Одним із важливих результатів проведених досліджень є експериментальне підтвердження того факту, що в F2-області іоносфери при низькій сонячній активності час життя неоднорідностей електронної концентрації може бути більш ніж в 10 разів більшим, ніж при високій сонячній активності. Було встановлено, що при низьких значеннях індексу W час життя неоднорідностей становить не менше 13 год, а при високих — десятки хвилин. З'ясуємо природу такої залежності.

Загасання амплітуди неоднорідностей пов'язане з частотою зіткнень електронів з молекулами та атомами (наприклад, атомарний кисень): що більша частота зіткнень, то менший є час життя збурення. Частота зіткнень пропорційна щільності атмосфери. Тому на висоті *z*_mF2 (~300 км) час життя неоднорідності становить 6 год, а на висоті 200 км, через істотно вищу концентрацію N_2 , час життя — всього 19 хв [12].

Щільність атмосфери дуже сильно залежить від стану сонячної активності. На рис. 11 наведено висотні профілі шільності атмосфери при низькій, середній і високій сонячній активності відповідно до моделі «Європейської кооперації по стандартизації в області космічної техніки». Як видно з графіків, на висоті 300 км щільність атмосфери для мінімуму і максимуму сонячної активності відрізняється приблизно у десять разів. Тому згідно з наведеною моделлю зроблені в статті висновки про велику відмінність часу життя неоднорідностей при низькій і високій сонячній активності видаються достовірними, їх можна рекомендувати використовувати при побудові прогностичної моделі глобального розподілу збуреної електронної концентрації F-області іоносфери.

У цій статті з використанням експериментальних даних, отриманих за різних геліогеофізичних умов, досліджено залежності $L(A_d)$. В роботі [5] експериментально показано, що для середньомасштабних РІЗ за різних геліогеофізичних умов просторовий горизонтальний період *L* виявився пропорційним відносній амплітуді A_d . Тому не дивно, що для великомасштабних РІЗ в результаті обробки даних, узятих з роботи [2] для низької сонячної активності, було отримано зростаючу лінійну регресію залежності $L(A_d)$. Натомість спадна регресія $L(A_d)$ для великомасштабних РІЗ при високій сонячній активності виявилася несподіванкою. Проте теоретичний аналіз і оцінки, виконані на його основі, підтвердили достовірність отриманих емпіричних залежностей. Аналіз здійснено за допомогою глобальної напівемпіричної моделі зародження і поширення АГХ-РІЗ [11]. Використання цієї моделі підтверджує адекватність згаданих емпіричних залежностей і свідчить на користь достовірності згаданої моделі АГХ-РІЗ.

7. ВИСНОВКИ

1. Для середньомасштабних, великомасштабних та глобальних РІЗ експериментальні значення $L(A_d)$ апроксимуються лінійною залежністю. Коефіцієнт лінійної регресії b_1 для великомасштабних і глобальних РІЗ відповідно у 4 та 20 разів більший, ніж для середньомасштабних РІЗ.

2. Для середньомасштабних РІЗ рівень сонячної активності не впливає на залежність $L(A_d)$.

3. Для великомасштабних РІЗ лінійна апроксимація $L(A_d)$ при низькому рівні сонячної активності є зростаючою залежністю, а для високого рівня — спадною.

4. Для глобальних РІЗ при низькому рівні сонячної активності лінійна апроксимація $L(A_d)$ є зростаючою залежністю.

5. Рівень геомагнітної активності не впливає на залежність $L(A_d)$ для середньомасштабних, великомасштабних і глобальних РІЗ.

6. При високому рівні сонячній активності час життя просторового періоду великомасштабних РІЗ визначається тривалістю його часового періоду і становить до 1...3 год, лінійна регресія просторових періодів від відносної амплітуди є спадною залежністю.

7. При низькому рівні сонячної активності час життя великомасштабних РІЗ може істотно перевершувати 6 год, лінійні регресії для великомасштабних і глобальних РІЗ є різко зростаючими залежностями.

8. Експериментальну залежність величини просторового періоду від нормованої амплітуди великомасштабних РІЗ при низькому і високому рівнях сонячної активності пояснює теорія зародження і поширення АГХ-РІЗ, розроблена науковими співробітниками Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна [11].

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Калиткин Н. Н. Численные методы: учеб. пособие. М.: Наука, 1978. 512 с.
- 2. 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.
- 3. Тырнов О. Ф., Федоренко Ю. П., Черногор Л. Ф. Исследование волновых возмущений электронной концентрации с помощью радиопросвечивания ионосферы когерентными сигналами навигационных спутников Земли. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2005. № 5. С. 36–80.
- 4. Федоренко В. Н., Федоренко Ю. П., Шагимуратов И. И. Результаты исследования ионосферы, полученные при помощи пространственно разнесенного приёма радиосигналов низкоорбитных навигационных ИСЗ. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1997. **37**, № 3. С. 121–126.
- 5. Федоренко Ю. П., Тырнов О. Ф., Федоренко В. Н. Параметры эмпирической модели перемещающихся ионосферных возмущений. Электромагнитные волны и электронные системы. 2008. **13**, № 1. С. 21–46.
- 6. Федоренко Ю. П., Федоренко В. Н., Дорохов В. Л. Наклон фронта в вертикальной плоскости и эффективная толщина слоя среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений. Вісник Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. 2010. № 942, вип. 17. С. 109—120.
- 7. Федоренко Ю. П., Федоренко В. Н., Дорохов В. Л. Определение параметров крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений при помощи радиопросвечивания ионосферы сигналами низкоорбитных навигационных ИСЗ. Вісник Харків. нац. ун-ту ім.і В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. 2012. № 1010, вип. 20. С. 97—112.
- 8. Федоренко Ю. П., Федоренко В. Н., Лысенко В. Н. Экспериментальные параметры модели среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011. **51**, № 1. С. 90–106.

- 9. Chiu Y. T. An improved phenomenological model of ionosphere density. J. Atmos. and Terr. Phys. 1975. 37. P. 1563-1570.
- 10. Evans J. V., Holt J. M., Wand R. H. A differential-Doppler study of traveling ionospheric disturbances from Millstone Hill. *Radio Sci.* 1983. **18**, No. 3. P. 435–451.
- 11. Fedorenko Yu. P., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. Model of traveling ionospheric disturbances. J. Space Weather Space Clim. 2013. 3, No. A30. P. 1–28. doi: 10.1051/swsc/2013052.
- 12. Francis S. H. A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. J. Geophys. Res. 1974. 79, No. 34. P. 5245-5260.
- Ogava T., Igarashi K., Aikyo K., Maeno H. Satellite observation of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Syowa station. Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys. 1988. 1. P. 192–198.
- Pushin V. F., Fedorenko V. N., Fedorenko Yu. P., Tyrnov O. F., Shagimuratov I. I. Space correction of global models of electron number density in the ionosphere by receiving at one site signals from low-orbit satellites. *Phys. Chem. Earth (C)*. 1999. 24, No. 4. P. 375–378.
- 15. Row R. V. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake. *J. Geophys. Res.* 1967. **72**, No. 5. P. 1599–1610.
- Tucker A. J., Fannin B. M. Analysis of ionospheric contribution to the Doppler-shift of CW signal from artificial Earth satellites. J. Geophys. Res. 1968. 73, No. 13. P. 4325–4334.
- 17. Willman J. F. Frequency-dependent ionospheric refraction effects on the Doppler shift of satellite signals. *EEEE transactions on aerospace and electronic systems*. 1965. AES-1, No. 3. P. 283 – 289.
- 18. Willman J. F., Tucker A. J. Accuracy of satellite Doppler data for ionospheric study, navigation, and geodesy. *J. Geophys. Res.* 1968. **73**, No. 1. P. 385–392.

Стаття надійшла до редакції 20.01.2019

REFERENCES

- 1. Kalitkin N. N. (1978). Numerical methods: Textbook. Moscow: Nauka, 512 p. [in Russian].
- 2. Tyrnov O. F., Fedorenko Y. P., Dorohov V. L. (2016). Spatio-temporal dynamics of traveling ionospheric disturbances. *Kosm. nauka tekhnol.*, **22** (5), 3–70 [in Russian].
- 3. Tyrnov O. F., Fedorenko Yu. P., Chernogor L. F. (2005). Studying wave-like disturbances of electron density using radio sounding of the ionosphere by coherent signals of navigation satellites. *Usp. Sovrem. Radioelektron.*, **1**, 36–80 [in Russian].
- 4. Fedorenko V. N., Fedorenko Yu. P., Shagimuratov I. I. (1997). Results of the ionosphere study by means of diversity reception of radiosignals of low-orbiting navigation satellites. *Geomagn. Aeron.*, **37** (3), 346–349. [in Russian].
- 5. Fedorenko Yu. P., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N. (2008). Parameters of empirical model of traveling ionospheric disturbances. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, **13** (1), 21–46 [in Russian].
- Fedorenko Yu. P., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. (2010). Front inclination in a vertical plane of medium-scale traveling ionospheric disturbances and an effective thickness of a layer of their detection. *Visn. Kharkiv Karazin Nat. Univ., Ser. Radiofiz. Elektron.*, 17 (942), 109–120 [in Russian].
- Fedorenko Yu. P., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. (2012). Diagnostics of parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances with the help radioscopy ionosphere by signals low-orbital navigating satellites, *Visn. Kharkiv Karazin Nat. Univ., Ser. Radiofiz. Elektron.*, 20 (1010), 97–112 [in Russian].
- 8. Fedorenko Yu. P., Fedorenko V. N., Lysenko V. N. (2011). Parameters of the medium-scale traveling ionospheric disturbances model deduced from measurements. *Geomagn. Aeron.*, **51** (1), 90–106 [in Russian].
- 9. Chiu Y. T. (1975). An improved phenomenological model of ionosphere density. J. Atmos. and Terr. Phys., 37, 1563–1570.
- 10. Evans J. V., Holt J. M., Wand R. H. (1983). A differential-Doppler study of traveling ionospheric disturbances from Millstone Hill. *Radio Sci.*, **18** (3), 435–451.
- Fedorenko Y. P., Tyrnov O. F., Fedorenko V. N., Dorohov V. L. (2013). Model of traveling ionospheric disturbances. J. Space Weather Space Clim., 3 (A30), 1–28. doi: 10.1051/swsc/2013052.
- 12. Francis S. H. (1974). A theory of medium-scale traveling ionospheric disturbances. J. Geophys. Res., 79 (34), 5245-5260.
- 13. Ogava T., Igarashi K., Aikyo K., Maeno H. (1988). Satellite observation of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Syowa station. *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, **1**, 192–198.
- Pushin V. F., Fedorenko V. N., Fedorenko Yu. P. Tyrnov O. F., Shagimuratov I. I. (1999). Space correction of global models of electron number density in the ionosphere by receiving at one site signals from low-orbit satellites. *Phys. Chem. Earth (C)*, 24 (4), 375–378.
- 15. Row R. V. (1967). Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere due to a nuclear detonation and an earthquake. J. *Geophys. Res.*, **72** (5), 1599–1610.
- 16. Tucker A. J., Fannin B. M. (1968). Analysis of ionospheric contribution to the Doppler-shift of CW signal from artificial Earth satellites. *J. Geophys. Res.*, **73** (13), 4325–4334.

- 17. Willman J. F. (1965). Frequency-dependent ionospheric refraction effects on the Doppler shift of satellite signals. *EEEE transactions on aerospace and electronic systems*, **AES-1** (3), 283–289.
- 18. Willman J. F., Tucker A. J. (1968). Accuracy of satellite Doppler data for ionospheric study, navigation, and geodesy. J. *Geophys. Res.*, **73** (1), 385–392.

Received 20.01.2019

Yu. P. Fedorenko Cand. Sci. in Phys. & Math., Senior Researcher E-mail: FedorenkoYP@gmail.com

V. N. Karazin Kharkiv National University 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

DEPENDENCE OF SPATIAL PERIODS OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ON THEIR RELATIVE AMPLITUDES

The relationship between the horizontal spatial period L and the relative amplitude A_d of traveling ionospheric disturbances (TID) at various levels of solar (SA) and geomagnetic (GA) activity is experimentally studied. In the vast majority of cases, the TIDs observed during our study were generated by high-latitude sources. It was found that the period L and amplitude A_d of the medium-scale (MS) TIDs (L = 100...800 km) are related by a linear dependence, which does not depend upon the SA level. For large-scale (LS) TID with L = 1000...4000 km, the linear approximation of the function $L(A_d)$ at low and high SA levels are increasing or decreasing functions, respectively. For global-scale (GM) TIDs with L = 5000...35000 km at low SA levels, the linear approximation $L(A_d)$ is an increasing function. The function $L(A_d)$ for TIDs of all spatial scales does not depend upon the GA level. The data were collected at the radio-physical observatory of V. N. Karazin Kharkiv National University ($\varphi = 49.63^{\circ}$ N, $\lambda = 36.32^{\circ}$ E) in 1999–2010 with the ionosphere radio sounding by using coherent radio waves at frequencies of about 150 and 400 MHz radiated by low-orbit navigation satellites *Parus* and *Cicada* orbiting at circular near-polar orbit with a height of about 1000 km. The experimental dependence of the horizontal period L of TID upon their relative amplitude A_d is explained based on the global prognostic semi-empirical model of the generation and propagation of acoustic-gravitational waves and traveling ionospheric disturbances.

Keywords: traveling ionospheric disturbance, horizontal spatial period, relative amplitude, solar activity level, magnetic activity level, linear regression.

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.060 УДК 528.835; 521.9; 535.2

В. О. ДАНИЛЕВСЬКИЙ

старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук E-mail: vdanylevsky@gmail.com, vdan@observ.univ.kiev.ua

Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053 Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

КУТОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ РОЗСІЮВАННЯ СОНЯЧНОГО СВІТЛА ЗЕМНОЮ АТМОСФЕРОЮ, СПОСТЕРЕЖУВАНІ ПРИЛАДОМ «СКАНПОЛ» ПРОЄКТУ «АЕРОЗОЛЬ-UA»

У статті оцінюються кутові характеристики розсіювання сонячного світла земною атмосферою та параметри об'єму атмосфери й ділянок земної поверхні, спостережуваних приладом «СканПол» проєкту «Аерозоль-UA» для визначення параметрів аерозольних частинок з орбіти штучного супутника Землі. Отримано оцінки діапазону кутів розсіювання у нижній тропосфері, що можуть спостерігатися приладом «СканПол» з сонячно-синхронної приполярної орбіти висотою 705 км і нахилом 98.1° з перетином супутником висхідного вузла на екваторі о 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв місцевого середнього сонячного часу. Оцінки кутів розсіювання отримано при кожній з трьох реалізацій орбіти для ділянок земної поверхні північної півкулі, де зенітна відстань Сонця становить 80°, 50°, та мінімально можлива для кожної реалізації орбіти на дати поблизу літнього і зимового сонцестоянь (21 червня і 21 грудня) та осіннього рівнодення (21 вересня) 2020 р. Діапазон кутів розсіювання обчислено для усього діапазону кутів сканування приладу «СканПол», що становить 110° уздовж підсупутникової траси. Він найбільший при найбільшій з прийнятих тут зенітній відстані Сонця 80°, яка настає у приполярних широтах північної півкулі у період від весняного до осіннього рівнодення, і у середніх широтах протягом іншої частини року, і становить приблизно 51.1°...149.5° близько літнього сонцестояння для орбіти з часом проходження супутником висхідного вузла на екваторі (T_{BB}) 21 год 30 хв та 41.9°...172.9° при Т_{BB} = 23 год 30 хв. Найменший діапазон кута розсіювання має місце при мінімальних зенітних відстанях Сонця біля дня зимового сонцестояння і становить приблизно 103.2°…142.8° та 108.2°...170.4° для зазначених Т_{вв} відповідно. Для решти зенітних кутів Сонця діапазони кутів розсіювання мають проміжні значення. Зменшення цього діапазону відбувається переважно за рахунок скорочення з боку малих кутів розсіювання. У підсумку діапазон спостережуваних кутів розсіювання найбільший для орбіти з місцевим часом, близьким до полудня, що у випадку орбіти із зазначеним тут нахилом відповідає Т_{ВВ} приблизно від 22 год 30 хв до 24 год 00 хв. Порівняння діапазонів кутів розсіювання, спостережуваних приладом «СканПол», з даними моделювання показало, що вимірювання з приладом «СканПол» на зазначеній орбіті дозволяють визначати мікрофізичні й оптичні характеристики аерозольних частинок. У процесі сканування лінійний розмір уздовж підсупутникової траси ділянки земної поверхні у миттєвому полі зору приладу змінюється приблизно від 6 км у надирі до майже 60 км при найбільшому куті сканування 60°, а унаслідок обертання Землі довгота спостережуваної ділянки при цьому зменшується приблизно на 1.55°, що відповідає її лінійному зміщенню уздовж паралелі від DS ≈172 км на екваторі до DS ≈ 24.5 км на широті 82°. Тому результати вимірювань з приладом «СканПол» можуть бути використані при їхньому мезомасштабному усередненні.

Ключові слова: земна атмосфера, оптика атмосфери, дистанційні дослідження, аерозолі, розсіювання сонячного світла.

Цитування: Данилевський В. О. Кутові характеристики розсіювання сонячного світла земною атмосферою, спостережувані приладом «СканПол» проєкту «Аерозоль-UA». *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6 (127). С. 60–74. https://doi.org/10.15407/knit2020.06.060

вступ

Дистанційні дослідження аерозолів у земній атмосфері необхідні для правильного оцінювання їхньої ролі у сучасних кліматичних моделях [7, 14, 27]. Такі оцінки можливі лише за умови, що крім просторово-часового розподілу концентрації аерозольних частинок у атмосфері відомі ще й їхні характеристики, які впливають як на розсіювання та поглинання цими частинками сонячного світла у атмосфері, так і на їхню ефективність як центрів конденсування водяної пари, від чого залежать кількість і властивості хмар. Зокрема, це такі характеристики частинок, як розподіл по розмірах, їхня морфологія, густина, показник заломлення [12, 21, 23, 26]. Оскільки розподіл частинок по розмірах у земній атмосфері, як правило, двомодальний (якщо ігнорувати так звані ядра Ейткена, які дистанційними методами не виявляються) [9], то зазначені характеристики повинні визначатися для кожної моди. Зазначені характеристики аерозольних частинок визначаються з наземних та супутникових дистанційних вимірювань інтенсивності розсіяного земною атмосферою сонячного оптичного випромінювання шляхом розв'язування відповідних рівнянь. Ці рівняння описують кількісно процеси розсіювання світла цими частинками з урахуванням розсіювання на флуктуаціях густини газової атмосфери (релеївське розсіювання) та поглинання її газовими складовими [17]. При цьому алгоритм розв'язування відповідної оберненої задачі повинен обов'язково забезпечувати визначення вмісту й параметрів несферичних частинок, таких як грунтовий пил, сажа, частинки біологічного походження і т. п. Їхнє ігнорування може призвести, особливо при супутникових вимірюваннях, до значних похибок інших параметрів аерозольного шару й частинок, таких як аерозольна оптична товщина атмосфери, розподіл частинок за розмірами, показник заломлення [11].

Крім параметрів частинок та оптичних характеристик атмосфери, рівняння для інтенсивності спостережуваного супутниковим приладом світла, відбитого від земної поверхні і розсіяного атмосферою, включають і оптичні характеристики земної поверхні у полі зору інструмента. Усе це призводить до того, що відповідна обернена задача часто стає некоректною, тобто число визначуваних параметрів перевищує кількість спостережних даних. Для подолання некоректності задачі істотним є збільшення кількості вимірюваних параметрів спостережуваної ділянки поверхні й атмосфери у полі зору інструмента. Крім того, щоб параметри частинок можна було визначити з достатньою точністю, необхідною для метеорологічних і кліматичних моделей, характеристики інструментів повинні забезпечувати вимірювання інтенсивності і стану поляризації у якомога ширшому спектральному діапазоні. Так, щоб скласти уявлення про хімічний склад аерозольних частинок, комплексний показник заломлення частинок повинен визначатись з вимірювань у спектральному діапазоні $\lambda = 0.4...$ 2.2 мкм. Ще однією з вимог до інструментів є їхня здатність вимірювати один і той же об'єм атмосфери з різних напрямків, тобто при різних кутах розсіювання, що збільшує число вимірюваних характеристик розсіяного світла [25].

У роботі [11] виконано детальне моделювання залежностей параметрів потоку випромінювання, розсіяного аерозольними частинками, від характеристик частинок і кута розсіювання. Розглядалися частинки різних розмірів у формі сфери і сфероїдів та їхні суміші. Розподіл по розмірах двомодальний лог-нормальний, у широкому діапазоні розмірів (параметр розміру $2\pi r/\lambda$ змінювався у межах від 0.012 до 625, що відповідає радіусам частинок $r \approx 0.001$ мкм при довжині світлової хвилі $\lambda = 0.44$ мкм і $r \approx 0.002$ мкм при $\lambda = 1.02$ мкм, та $r \approx 44$ мкм при довжині світлової хвилі $\lambda = 0.44$ мкм і $r \approx 100$ мкм при $\lambda = 1.02$ мкм відповідно). Мінімум розподілу був приблизно при 0.4...0.5 мкм. Моделювання виконувалось для частинок з дійсною частиною показника заломлення n = 1.33...1.6 та уявною i = 0.0005...0.5. З аналізу результатів моделювання випливає, що для визначення параметрів аерозольних частинок (розподіл по розмірах, форми, показника заломлення) необхідно вимірювати інтенсивність і ступінь поляризації розсіяного земною атмосферою сонячного світла у щонайширшому діапазоні кутів розсіювання, бажано від 0



Рис. 1. Кути між напрямками прямого й розсіяного пучків сонячного світла у земній атмосфері: Z_{\odot} , Z_{Sat} — зенітна відстань Сонця й супутника відповідно у спостережуваній точці, ΔA — різниця азимутів відповідних векторів, Θ — кут розсіювання сонячного світла у бік супутника відносно напрямку поширення світлового пучка

до 180°. Зокрема, ступінь лінійної поляризації світла, розсіяного частинками грунтового пилу, буде найвищим у діапазоні кутів розсіювання від 30° до 160°, тоді як у випадку дрібних сферичних частинок цей параметр помітно змінюється залежно від показника заломлення у всьому діапазоні від 0 до 180°. Також фазова функція істотно залежить від показника заломлення для дрібнодисперсних частинок і крупнодисперсних сфер і сфероїдів у всьому діапазоні кутів розсіювання. З цих причин, зокрема, вимога до вимірювань інтенсивності і ступеня поляризації розсіяного у земній атмосфері світла у щонайширшому інтервалі кутів розсіювання, ставилася і до приладу APS місії NASA Glory [25].

Створювані спектрополяриметри «СканПол» і МСІП космічного проєкту «Аерозоль-UA» відповідають зазначеним вище вимогам, оскільки будуть забезпечувати одночасні вимірювання інтенсивності та ступеня лінійної поляризації розсіяного земною поверхнею і атмосферою сонячного світла у діапазоні спектру $\lambda = 0.37...2.2$ мкм у діапазоні кутів спостереження 110° [24]. Метою цієї статті є оцінити ефективність таких ширококутних вимірювань для визначення параметрів аерозольних частинок у залежності від кута спостережень з орбіти ШСЗ.

АЛГОРИТМ ОБЧИСЛЕНЬ КУТІВ РОЗСІЮВАННЯ ДЛЯ ПРИЛАДУ «СКАНПОЛ»

Кут розсіювання у дистанційних дослідженнях земної атмосфери відраховується від напрямку поширення пучка сонячного випромінювання (рис. 1) [20]. У нашому випадку, тобто при спостереженнях з супутника, цей кут обчислюється за формулою

$$\Theta = \pi - \arccos[\cos Z_{\odot} \cdot \cos Z_{Sat} +$$

$$+\sin Z_{\odot} \cdot \sin Z_{Sat} \cdot \cos(\Delta A)].$$

Позначення параметрів цієї формули зрозуміле з рис. 1. Вираз у квадратних дужках дорівнює косинусові кута між напрямками на Сонце та на супутник з точки у атмосфері або на земній поверхні, у якій відбувається розсіювання світла (див. наприклад у [2]). Зенітний кут Сонця Z_{\odot} для зазначеної точки, де відбувається розсіювання світла, обчислюється за відомою зі сферичної астрономії формулою:

$$\cos Z_{\odot} = \sin \phi \cdot \sin \delta_{\odot} + \cos \phi \cdot \cos \delta_{\odot} \cdot \cos T_{\odot},$$

де φ — широта зазначеної точки на земній поверхні чи у атмосфері над земною поверхнею, δ_{\odot} і T_{\odot} — відповідно топоцентричні схилення та часовий кут Сонця на момент вимірювань.

Топоцентричні (тобто визначені з урахуванням добового паралаксу небесного світила для спостерігача на поверхні земного еліпсоїда або на відомій висоті над нею) координати Сонця обчислюються для спостережуваної приладом «СканПол» на земній поверхні або в атмосфері ділянки з відомими геоцентричними координатами (широта, довгота і геоцентричний радіусвектор). У цій роботі топоцентричні координати Сонця обчислюються за його геоцентричними координатами, обчисленими на основі фундаментальних ефемерид DE405/LE405 [13, 28] приблизно на момент проходження супутником нисхідного вузла його орбіти на земному екваторі (тобто на денній частині орбіти) у шкалі середнього сонячного часу гринвіцького меридіану (ССЧ ГМ). Обчислення цих координат виконуються за формулами, відомими з ефемеридної астрономії та астрометрії з використанням фундаментальних астрономічних сталих Міжнародного астрономічного союзу (МАС) 1976 і 1979 рр. [1, 3, 13]. Оскільки, як показали дослідження розподілу з висотою аерозолів у земній атмосфері, основна їхня маса зосереджена у нижній частині тропосфери, до висоти 5-6 км [15, 19, 30], то у цій роботі топоцентричні координати спостережуваного приладом «СканПол» об'єму атмосфери обчислюються як для поверхні земного еліпсоїда.

Геоцентричні координати спостережуваного приладом «СканПол» об'єму атмосфери та ділянки на земній поверхні обчислюються для положень супутника на коловій сонячно-синхронній орбіті з висотою 705 км і відповідним періодом 98.7 хв, обчисленим за 3-м законом Кеплера, при нахилі орбіти 98.1°. Наземна траса такої орбіти, де для визначеності довгота висхідного вузла на земному екваторі становить 200° на схід від гринвіцького меридіана (або ж -160° на захід від нього), показана на рис. 2. Геоцентричні ж координати супутника (широта й довгота при зазначеній висоті над земною поверхнею) обчислюються за формулами сферичної тригонометрії уздовж його орбіти із заданим інтервалом часу за відомою швидкістю руху супутника по такій орбіті. Для цього спочатку за відомою геоцентричною кутовою швидкістю супутника обчислюється довжина дуги орбіти на кожен момент часу відносно її висхідного вузла на екваторі, і потім, за відомим нахилом орбіти та довготою висхідного вузла обчислюються відповідні довгота й широта супутника з урахуванням швидкості обертання Землі. При цьому використано параметри фігури Землі (земного еліпсоїда) згідно з системою фундаментальних астрономічних сталих МАС 1976 р. і 1979 р. Прецесією орбіти супутника за рахунок несферичності Землі тут знехтувано, оскільки при зазначеному нахилі 98.1° вона не перевищує 1° за добу [8].

Схема сканування земної поверхні й атмосфери приладом «СканПол» показана на рис. 3. Координати спостережуваної приладом «Скан-Пол» ділянки на наземній підсупутниковій трасі визначаються відносно геоцентричних координат супутника з плоского трикутника *SOP* для



Рис. 2. Траса супутника з приладами «Аерозоль-UA» на земній поверхні (між точками — інтервал 1 хв)



Рис. 3. Схема сканування приладом «СканПол» спостережуваної ділянки P на земній поверхні у площині орбіти супутника: O — центр земної сфери, S — положення супутника в орбіті на відповідний момент часу, R_E — середній радіус Землі, H — висота орбіти супутника над земною поверхнею, A_{EC} — кут при центрі земної сфери між послідовними радіусами-векторами супутника та спостережуваної точки, D_{Sat} — відстань між супутника в орбіті), A_{Sen} — кут сканування (положення супутника в орбіті), A_{Sen} — кут сканування відносно надира, Z_{Sat} — зенітна відстань супутника відносно спостережуваної точки для відповідного кута сканування відносно точсережуваної точки для відповідного кута сканування відносно точсе режуваної точки для відповідного кута сканування відносно спостережуваної точки для відповідного кута сканування відносно спостережуваної точки для відповідного кута сканування відносно спостережуваної точки для відповідного кута сканування

відомого кута сканування $A_{Scn} = \angle(OSP)$ уперед у напрямку руху супутника і назад у площині орбіти. Земля тут вважається сферичною з радіусом $R_{\rm E} = 6371$ км, а висота орбіти H = 705 км, як зазначено вище. Із зазначеного трикутника визначається кут A_{EC} при центрі Землі, тобто кутова відстань уздовж підсупутникової траси між положеннями підсупутникової точки та спостережуваної ділянки. Значення кута A_{Scn} дорівнює



Рис. 4. Положення спостережуваної ділянки P відносно підсупутникової точки S уздовж траси супутника: i — кут нахилу орбіти супутника до екватора, J — кут між площинами орбіти і меридіана супутника, $\Delta\lambda$, $\Delta\phi$ — різниця довгот і широт підсупутникової точки і спостережуваної ділянки

50° при першому потраплянні спостережуваної ділянки у поле зору «СканПол», і –60° — при останньому [4, 5, 24].

Потім, за відомих нахилу орбіти супутника до земного екватора *i*, широти й довготи супутника (точніше — підсупутникової точки), за відомими формулами сферичної тригонометрії для прямокутного трикутника обчислюються координати спостережуваної точки *P* на земній поверхні (рис. 4). Наприклад, використовуючи формулу синусів:

 $\sin(\varphi_S - \varphi_P) = \sin(S \cup P) \cdot \sin(\pi - i) ,$

і формулу косинусів:

$$\cos(\lambda_S - \lambda_P) = \frac{\cos(S \cup P)}{\cos(\varphi_S - \varphi_P)},$$

де кутова довжина дуги $S \cup P = A_{FC}$.

Для обчислень зенітного кута супутника відносно спостережуваної ділянки у нашому випадку використовуються співвідношення, що одержуються з плоских трикутників, які з'єднують цю ділянку, центр Землі і супутник (рис. 3) на кожен момент вимірювань:

$$Z_{Sat} = \angle OSP + A_{EC}$$

оскільки центр спостережуваної ділянки лежить у площині орбіти супутника. З цієї ж причини азимути супутника для спостережуваної ділянки збігаються з азимутальним кутом підсупутникової траси, що проходить через цю ділянку. Тобто, азимут супутника дорівнюватиме кутові *J* між підсупутниковою трасою та меридіаном у спостережуваній ділянці (рис. 4), який обчислюється за очевидною простою формулою: sin*J* = $= \cos i/\cos \varphi_p$ [8], і змінюється на 180° при проходженні супутником зеніта.

Вимірювання хронометруються у шкалі UTC для гринвіцького меридіана, моменти часу кожного вимірювання вибраної спостережуваної ділянки відраховуються від моменту першого потрапляння її у поле зору «СканПол», а інтервал між вимірюваннями дорівнює періодові обертання системи сканувальних дзеркал приладу, що становить приблизно 1.5 с [4, 24], з доданком Δτ для врахування «довороту» сканувальної системи до напрямку на спостережувану ділянку унаслідок зміщення супутника за зазначений проміжок часу. Максимальна величина $\Delta \tau$ цього доданка становить приблизно 0.5 с для останнього вимірювання (при куті сканування -60°). Оскільки кутова довжина при центрі Землі відрізка орбіти супутника, що відповідає діапазонові кутів сканування 110°, становить приблизно 22.5°, а кутова швидкість руху супутника по орбіті становить приблизно 3.65 хв⁻¹, то тривалість усього циклу сканування становить приблизно 6.2 хв. За цей час при зазначеній швидкості обертання системи сканувальних дзеркал приладом «СканПол» з урахуванням руху супутника може бути зроблено не більше як 215 вимірювань під різними кутами параметрів світла, розсіяного однією спостережуваною ділянкою атмосфери й поверхні за умови, що вимірювання будуть виконуватись у кожен момент, коли спостережувана точка буде потрапляти у центр миттєвого поля зору приладу. Одначе насправді число таких вимірювань буде залежати від узгодженості інтервалів між вимірюваннями і швидкостями обертання сканувальних дзеркал та руху супутника. Тому можливо, що на момент вимірювань потрібний об'єм атмосфери та поверхня не зможуть хоча б частково потрапити у поле зору приладу, тобто вимірювання зазначеної точки будуть виконані не при кожному повороті сканувальних дзеркал. Відповідно і кількість кутів,

під якими ця ділянка спостерігатиметься, буде меншою, ніж наведена вище оцінка.

Кут розсіювання сонячного світла у спостережуваному об'ємі атмосфери при будь-якому положенні супутника на підсонячній частині орбіти залежить від зенітної відстані Сонця на час вимірювань. У свою чергу, діапазон зміни зенітного кута Сонця при русі супутника по орбіті залежить від часу проходження ним земного екватора. Тому тут одержані оцінки діапазонів спостережуваного приладом «СканПол» кута розсіювання для певних положень супутника на зазначеній орбіті з різним часом проходження супутником екватора. Слід зазначити, що практично усі прилади для досліджень аерозолів у земній атмосфері, як ті, що виконують вимірювання (наприклад MODIS/Terra MODIS/ Aqua, CALIOP та інші), так і майбутні, встановлюються на супутниках, що рухаються по сонячно-синхронних приполярних орбітах з нахилом приблизно 98° і висотами приблизно від 500 до 850 км [10]. При цьому, як правило, момент проходження екватора на освітленій ділянці орбіти вибирається або приблизно між 9:30 і 11:30 місцевого сонячного часу (дополудневі орбіти), або ж між 13:00 та 13:30 (післяполудневі орбіти). Площини цих орбіт мають сталу орієнтацію відносно напрямку на Сонце, і супутник перетинає екватор чи паралель будь-якої широти у один і той же місцевий сонячний час [8], а тому діапазон зміни зенітної відстані Сонця відносно спостережуваних точок на земній поверхні або ж у приземній атмосфері, і діапазони спостережуваних кутів розсіювання одні й ті ж при кожному витку. У нашому випадку розглядалася зазначена вище сонячно-синхронна приполярна орбіта з моментами проходження висхідного вузла на 200° східної довготи о 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв гринвіцького середнього сонячного часу, що відповідає місцевому середньому сонячному часові для приблизно 8° східної довготи 9 год 30 хв, 10 год 30 хв і 11 год 30 хв відповідно.

РЕЗУЛЬТАТИ І АНАЛІЗ

У роботі оцінювались діапазони кутів розсіювання для трьох зенітних відстаней Сонця відносно спостережуваного приладом «СканПол»

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

об'єму приземної атмосфери у випадку кожної із зазначених орбіт, а саме, 80°, 50°, і для мінімальної зенітної відстані Сонця, яка може бути на кожній з орбіт. Вибір зазначених зенітних кутів Сонця загалом довільний, зроблений з метою оцінювання обставин вимірювань у різних широтних зонах. Максимальний зенітний кут Сонця 80° вибрано за аналогією з процедурою вимірювань у наземній мережі сонячних фотометрів AERONET [16, 18], де це обмеження введене з метою уникнення впливу хмарності. Очевидно, що мінімальна зенітна відстань Сонця відповідає мінімальному діапазонові кутів розсіювання, що теж є важливим обмеженням ефективності досліджень. Обчислення виконано для частини орбіти над північною півкулею, оскільки ця частина земної кулі становить інтерес з точки зору оцінки вмісту й характеристик аерозолів антропогенного походження. Координати спостережуваної ділянки у кожному випадку залежать також від сезону, тому тут обчислення виконано приблизно на дати сонцестоянь і осіннього рівнодення 2020 р. Кути розсіювання обчислювались для кожної із зазначених вище спостережуваних ділянок на кожен з моментів вимірювань приладом «СканПол» із зазначеним вище кроком приблизно 1.5 с + $\Delta \tau$ у всьому діапазоні кутів сканування A_{Scn} (рис. 3). Крім того, щоб скласти уявлення про зміни параметрів спостережуваного об'єму земної атмосфери і ділянки на земній поверхні унаслідок руху супутника й обертання Землі, обчислювались також розміри ділянки на земній поверхні з урахуванням її кривини, що відповідають миттєвому розміру поля зору «СканПол» (0.5° [4, 24]) уздовж підсупутникової траси, та зміщення земної поверхні уздовж паралелі на схід протягом повного циклу сканування зазначеної спостережуваної ділянки, що триває приблизно 6 хв. Отже, тут поняття «спостережувана ділянка» досить умовне, і означає лише миттєве положення центра поля зору приладу, при цьому хоча широта цієї ділянки зберігається, довгота неперервно зменшується. Узагальнені результати обчислень наведено у таблиці. Тут для зазначених моментів часу й ділянок земної поверхні у полі зору приладу наведено мінімальне і максимальне значення кута розсіювання для

	Значення параметрів								
Параметри	Т _{вв} = 21 год 30 хв	Т _{ВВ} = 22 год 30 хв	Т _{вв} = 23 год 30 хв						
21 червня 2020 р.									
Z_{\odot}	30.5°	17.5°	5.0°						
A_{\odot}	107.0°	105.4°	135.6°						
φ _P	36.8°	29.4°	27.0°						
λ_p	16.9°	14.8°	14.2°						
$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	107.1°149.7°	107.0°162.6°	108.9°176.0°						
A _{Scn}	-60.0°3.2°	$-60.0^{\circ}1.3^{\circ}$	-60.0°2.3°						
Z_{Sat}	74.1°3.5°	74.0°1.4°	74.0°2.5°						
A_{Sat}	190.1°190.1°	189.3°189.3°	189.1° 189.1°						
ΔL , км	56.96.2	56.96.2	56.96.2						
ΔS , км	137.253.0	149.456.4	152.658.3						
Z_{\odot}	50.0°	50.0°	50.0°						
A_{\odot}	167.8°	186.4°	202.4°						
ϕ_P	73.1°	73.3°	72.3°						
λ_P	41.3°	41.7°	39.8°						
$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	81.2°149.7°	74.8°162.6°	71.9°176.0°						
Ascn	50.0°37.2°	50.0°41.5°	50.0°43.4°						
Z_{Sat}	58.3°42.2°	58.3°47.3°	58.3°49.7°						
A_{Sat}	29.0°209.0°	29.4°209.4°	27.6° 207.6°						
ΔL , км	19.910.7	19.912.7	19.913.8						
ΔS , км	0.029.6	0.031.2	0.034.1						
Z_{\odot}	80.0°	80.0°	80.0°						
	308.1°	316.6°	326.0°						
φ _ρ	67.0°	71.0°	73.6°						
λ_P	176.3°	171.1°	166.5°						
$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	51.1°149.5°	45.0°161.8°	41.9°172.9°						
A _{Scn}	50.0°60.0°	50.0°60.0°	50.0°60.0°						
Z_{Sat}	58.3°74.0°	58.3°74.0°	58.3°74.0°						
A_{Sat}	158.9°338.9°	154.3°334.3°	150.1° 330.1°						
ΔL , км	19.956.9	19.956.9	19.956.9						
ΔS , км	0.067.0	0.055.7	0.048.4						
	21 вер	есня 2020 р.							
Z_{\odot}	35.5°	21.0°	6.0°						
A_{\odot}	103.6	110.4°	118.3°						
ϕ_P	10.1°	8.1°	3.3°						
λ_P	10.3°	9.9°	8.9°						
$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	106.0°144.7°	109.2°159.5°	107.9°174.4°						
A _{Scn}	-60.0°3.2°	-60.0°4.1°	-60.0°2.2°						
Z_{Sat}	74.0°3.5°	74.0°4.5°	74.0°2.5°						
A _{Sat}	188.2°188.2°	188.2°188.2°	188.1° 188.1°						

Діапазони кутів розсіювання та параметри спостережуваної приладом «СканПол» ділянки земної поверхні

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

Параметри $T_{nn} = 21 \operatorname{rox} 30 \operatorname{xs}$ $T_{nn} = 23 \operatorname{rox} 30 \operatorname{xs}$ ΔL , KM 56.96.2 56.96.2 56.96.2 ΔS , KM 168.765.2 169.766.3 171.165.3 Z_5 50.0° 50.0° 50.0° A_5 142.22° 165.3° 185.4° ϕ_p 43.8° 49.5° 50.3° λ_p 19.1° 21.2° 21.6° $\Theta_{min}\Theta_{max}$ 84.9″144.7° 76.0″159.5° 72.0″174.4° A_{Sm} 50.0°41.0° 50.0°43.4° 72.3″43.4° A_{Sm} 11.3°191.3° 12.5″192.5° 12.7″192.7° A_{Am} 11.3°191.3° 12.5″192.5° 12.7″192.7° A_{Am} 19.956 19.912.4 19.913.8 ΔS_{AM} 0.069.7 0.069.9 0.071.6 Z_{5} 80.0° 80.0° 80.0° 21.70° ϕ_p 79.9° 79.2° 78.0° 24.1° 1.1.19° A_{Sm} 50.0″60.0	-	Значення параметрів						
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Параметри	Т _{ВВ} = 21 год 30 хв	Т _{вв} = 22 год 30 хв	Т _{вв} = 23 год 30 хв				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔL , км	56.96.2	56.96.2	56.96.2				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔS , км	168.765.2	169.766.3	171.165.3				
$ \begin{array}{c ccccc} A_{\odot} & 142.2^{\circ} & 165.3^{\circ} & 185.4^{\circ} \\ \phi_{P} & 43.8^{\circ} & 49.5^{\circ} & 50.3^{\circ} \\ \lambda_{P} & 19.1^{\circ} & 21.2^{\circ} & 21.6^{\circ} \\ \phi_{min}\theta_{max} & 84.9144.7^{\circ} & 76.0^{\circ}.159.5^{\circ} & 72.0^{\circ}74.4^{\circ} \\ A_{Sor} & 50.0^{\circ}33.5^{\circ} & 50.0^{\circ}41.0^{\circ} & 50.0^{\circ}43.4^{\circ} \\ Z_{Sar} & 58.3^{\circ}37.9^{\circ} & 58.3^{\circ}46.7^{\circ} & 58.3^{\circ}49.7^{\circ} \\ A_{Sar} & 11.3^{\circ}191.3^{\circ} & 12.5^{\circ}.192.5^{\circ} & 12.7^{\circ}192.7^{\circ} \\ A_{Sar} & 11.3^{\circ}191.3^{\circ} & 12.5^{\circ}.192.5^{\circ} & 21.17^{\circ} \\ A_{Sar} & 11.3^{\circ}191.3^{\circ} & 208.0^{\circ} & 217.0^{\circ} \\ \phi_{P} & 79.9^{\circ} & 79.2^{\circ} & 78.0^{\circ} \\ A_{\odot} & 197.8^{\circ} & 208.0^{\circ} & 217.0^{\circ} \\ \phi_{P} & 79.9^{\circ} & 79.2^{\circ} & 78.0^{\circ} \\ \lambda_{P} & 67.3^{\circ} & 62.1^{\circ} & 55.8^{\circ} \\ \phi_{min}\theta_{max} & 54.1^{\circ}144.5^{\circ} & 46.2^{\circ}158.9^{\circ} & 42.1^{\circ}74.0^{\circ} \\ A_{Sar} & 50.0^{\circ}60.0^{\circ} & 50.0^{\circ}60.0^{\circ} \\ S.0^{\circ}60.0^{\circ} & 50.0^{\circ}60.0^{\circ} \\ A_{Sar} & 53.7^{\circ}233.7^{\circ} & 48.8^{\circ}228.8^{\circ} & 42.7^{\circ}222.7^{\circ} \\ A_{Sar} & 53.5^{\circ}74.0^{\circ} & 58.3^{\circ}74.0^{\circ} \\ S.3^{\circ}65.9 & 19.956.9 \\ D_{Sar} & 50.0^{\circ}60.0^{\circ} & 50.0^{\circ}61.0^{\circ} \\ S.5_{SA} & 0.032.2 & 0.035.6 \\ \hline D_{Sar} & 50.0^{\circ}61.0^{\circ} & 50.0^{\circ}61.0^{\circ} \\ A_{Sar} & 50.0^{\circ}61.0^{\circ} & 50.0^{\circ}61.0^{\circ} \\ S_{Sar} & 7.2^{\circ} & -16.7^{\circ} & -19.8^{\circ} \\ A_{Sar} & 0.030.0 & 0.032.2 & 0.035.6 \\ \hline D_{Sar} & 10.3^{\circ}142.8^{\circ} & 10.94^{\circ}156.6^{\circ} & 108.2^{\circ}170.4^{\circ} \\ A_{Sar} & 74.0^{\circ}04^{\circ} & 74.0^{\circ}56^{\circ} & 74.0^{\circ}25^{\circ} \\ A_{Sar} & 74.0^{\circ}04^{\circ} & 74.0^{\circ}56^{\circ} & 74.0^{\circ}25^{\circ} \\ A_{Sar} & 188.8^{\circ}188.8^{\circ} & 188.5^{\circ}188.5^{\circ} & 188.6^{\circ}188.6^{\circ} \\ A_{Sar} & 74.0^{\circ}4^{\circ} & 74.0^{\circ}56^{\circ} & 74.0^{\circ}25^{\circ} \\ A_{Sar} & 74.0^{\circ}62 & 56.962 & 56.962 \\ \Delta S_{S} KM & 158.5^{\circ}188.8^{\circ} & 188.5^{\circ}188.5^{\circ} & 188.6^{\circ} & 188.6^{\circ} \\ A_{Sar} & 74.0^{\circ}25^{\circ} & 50.0^{\circ} & 50.0^{\circ} \\ A_{O} & 136.1 & 157.5^{\circ} & 176.4^{\circ} \\ A_{Sar} & 74.0^{\circ}25^{\circ} & 50.0^{\circ}25^{\circ} & 50.0$	Z_{\odot}	50.0°	50.0°	50.0°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	A_{\odot}	142.2°	165.3°	185.4°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Φp	43.8°	49.5°	50.3°				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	λ_P	19.1°	21.2°	21.6°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	84.9°144.7°	76.0°159.5°	72.0°174.4°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	A _{Scn}	50.0°33.5°	50.0°41.0°	50.0°43.4°				
A_{Sat}^{Sat} 11.3*191.3* 12.5*192.5* 12.7*192.7* ΔL , KM 19.99.6 19.912.4 19.913.8 ΔS , KM 0.069.7 0.069.9 0.071.6 Z_{\odot} 80.0* 80.0* 80.0* A_{\odot} 197.8* 208.0* 217.0* φ_p 79.9* 79.2* 78.0* λ_p 67.3* 62.1* 55.8* $\Theta_{min}\Theta_{max}$ 54.1*144.5* 46.2*158.9* 42.1*171.9* A_{Scn} 50.0*60.0* 50.0*60.0* 50.0*60.0* Z_{Sat} 58.3*74.0* 58.3*74.0* 58.3*74.0* A_{Sat} 53.3*7* 48.8*228.8* 42.7*222.7* ΔL , KM 19.956.9 19.956.9 19.956.9 $\Delta S_{S,KM}$ 0.030.0 0.032.2 0.035.6 Z_{\odot} 37.2* 24.0* 10.0* A_{\odot} 99.8* 110.4* 113.4* ϕ_p 23* 109.4*156.6* 108.2*170.4* <td>$Z_{S_{at}}$</td> <td>58.3°37.9°</td> <td>58.3°46.7°</td> <td>58.3°49.7°</td>	$Z_{S_{at}}$	58.3°37.9°	58.3°46.7°	58.3°49.7°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	A_{Sat}	11.3°191.3°	12.5°192.5°	12.7° 192.7°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔL , KM	19.99.6	19.912.4	19.913.8				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔS , км	0.069.7	0.069.9	0.071.6				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Zo	80.0°	80.0°	80.0°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	 A	197.8°	208.0°	217.0°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	0 n	79.9°	79.2°	78.0°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ψ_p	67.3°	62.1°	55.8°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΘΘ	54.1°144.5°	46.2°158.9°	42.1°171.9°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Ac	50.0°60.0°	50.0°60.0°	50.0°60.0°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Za	58 3° 74 0°	58 3° 74 0°	58 3° 74 0°				
Λ_{Sat} 10.0 m.20.010.0 m.20.010.0 m.20.0 ΔL , км19.956.919.956.919.956.9 ΔS , км0.030.00.032.20.035.6 Z_{\odot} 37.2°24.0°10.0° A_{\odot} 99.8°110.4°113.4° ϕ_P -22.3°-16.7°-19.8° λ_p 3.3°4.6°3.9° $\Theta_{min}\Theta_{max}$ 103.2°142.8°109.4°156.6°108.2°170.4° A_{Sen} -60.0°0.4°-60.0°5.0°-60.0°2.2° Z_{Sat} 74.0°0.4°188.5°188.6°188.6° A_{Sat} 188.8°188.8°188.5°188.6°188.6° ΔL , км56.96.256.96.256.96.256.96.2 ΔS_{KM} 158.559.1164.265.0161.361.6 Z_{\odot} 50.0°50.0°50.0°50.0° A_{\odot} 136.1157.5°176.4° ϕ_P 12.6°23.1°26.4° λ_P 10.9°13.3°14.1° $\Theta_{min}\Theta_{max}$ 86.5°142.8°77.4°156.6°72.7°170.4° A_{Sen} 50.0°32.2°50.0°39.9°50.0°42.9° Z_{Sep} 58.3°36.3°58.3°45.5°58.3°49.1°	A_{-}	53 7° 233 7°	48.8° 228.8°	42 7° 222 7°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔI KM	19.9 56.9	19.9 56.9	19.9 56.9				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔS KM	0.0 30.0	0.0 32.2	0.0 35.6				
Z_{\odot} 37.2° 24.0° 10.0° A_{\odot} 99.8° 110.4° 113.4° ϕ_{P} -22.3° -16.7° -19.8° λ_{P} 3.3° 4.6° 3.9° $\Theta_{\min}\Theta_{max}$ $103.2^{\circ}142.8^{\circ}$ $109.4^{\circ}156.6^{\circ}$ $108.2^{\circ}170.4^{\circ}$ A_{Sen} $-60.0^{\circ}0.4^{\circ}$ $-60.0^{\circ}5.0^{\circ}$ $-60.0^{\circ}2.2^{\circ}$ Z_{Sat} $74.0^{\circ}04^{\circ}$ $74.0^{\circ}56^{\circ}$ $74.0^{\circ}2.5^{\circ}$ A_{Sat} $188.8^{\circ}188.8^{\circ}$ $188.5^{\circ}188.5^{\circ}$ $188.6^{\circ}188.6^{\circ}$ ΔL , KM $56.96.2$ $56.96.2$ $56.96.2$ ΔS , KM $158.559.1$ $164.265.0$ $161.361.6$ Z_{\odot} 50.0° 50.0° 50.0° A_{\odot} 12.6° 23.1° 26.4° λ_{P} 10.9° 13.3° 14.1° $\Theta_{\min}\Theta_{max}$ $86.5^{\circ}142.8^{\circ}$ $77.4^{\circ}156.6^{\circ}$ $72.7^{\circ}170.4^{\circ}$ A_{Sen} $50.0^{\circ}32.2^{\circ}$ $50.0^{\circ}39.9^{\circ}$ $50.0^{\circ}42.9^{\circ}$ Z_{Sat} $58.3^{\circ}36.3^{\circ}$ $58.3^{\circ}45.5^{\circ}$ $58.3^{\circ}45.5^{\circ}$		21 rr	оллня 2020 n.					
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	Z	37.2°	24 0°	10 0°				
$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	2 A -	99.8°	110 4°	113.4°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	21 ₀	_22.3°	-16.7°	_19.8°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	γ_p	3.3°	4.6°	3.9°				
$M_{\rm min} = max$ $-60.0^{\circ}0.4^{\circ}$ $-60.0^{\circ}5.0^{\circ}$ $-60.0^{\circ}2.2^{\circ}$ Z_{Sat} $74.0^{\circ}0.4^{\circ}$ $74.0^{\circ}5.6^{\circ}$ $74.0^{\circ}2.5^{\circ}$ A_{Sat} $188.8^{\circ}188.8^{\circ}$ $188.5^{\circ}188.5^{\circ}$ $188.6^{\circ}188.6^{\circ}$ ΔL , KM $56.96.2$ $56.96.2$ $56.96.2$ ΔS , KM $158.559.1$ $164.265.0$ $161.361.6$ Z_{\odot} 50.0° 50.0° 50.0° A_{\odot} 136.1 157.5° 176.4° φ_P 12.6° 23.1° 26.4° λ_P 10.9° 13.3° 14.1° $\Theta_{\min}\Theta_{max}$ $86.5^{\circ}142.8^{\circ}$ $77.4^{\circ}156.6^{\circ}$ $72.7^{\circ}170.4^{\circ}$ δ_{Scn} $58.3^{\circ}46.3^{\circ}$ $58.3^{\circ}49.1^{\circ}$ $58.3^{\circ}49.1^{\circ}$	······································	103.2°142.8°	109.4°156.6°	108.2°170.4°				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	A_{Serr}	$-60.0^{\circ}0.4^{\circ}$	-60.0°5.0°	-60.0°2.2°				
Sal188.8°188.8°188.5°188.5°188.6°188.6° ΔL , KM56.96.256.96.256.96.2 ΔS , KM158.559.1164.265.0161.361.6 Z_{\odot} 50.0°50.0°50.0° A_{\odot} 136.1157.5°176.4° ϕ_P 12.6°23.1°26.4° λ_P 10.9°13.3°14.1° $\Theta_{\min}\Theta_{max}$ 86.5°142.8°77.4°156.6°72.7°170.4° A_{Scn} 50.0°32.2°50.0°39.9°50.0°42.9° Z_{Satt} 58.3°36.3°58.3°45.5°58.3°49.1°	Z_{s}	74.0°0.4°	74.0°5.6°	74.0°2.5°				
ΔL , KM56.96.256.96.256.96.2 ΔS , KM158.559.1164.265.0161.361.6 Z_{\odot} 50.0°50.0°50.0° A_{\odot} 136.1157.5°176.4° φ_P 12.6°23.1°26.4° λ_P 10.9°13.3°14.1° $\Theta_{\min}\Theta_{max}$ 86.5°142.8°77.4°156.6°72.7°170.4° A_{Scn} 50.0°32.2°50.0°39.9°50.0°42.9° Z_{Sat} 58.3°36.3°58.3°45.5°58.3°49.1°	A_{S-1}	188.8°188.8°	188.5°188.5°	188.6° 188.6°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔL , KM	56.96.2	56.96.2	56.96.2				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	ΔS , км	158.559.1	164.265.0	161.361.6				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	Z_{\odot}	.50.0°	50.0°	50.0°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	- <u>o</u> A_	136.1	157.5°	176.4°				
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	• (0 n	12.6°	23.1°	26.4°				
$ \begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	λ_P	10.9°	13.3°	14.1°				
A_{Scn} $50.0^{\circ}32.2^{\circ}$ $50.0^{\circ}39.9^{\circ}$ $50.0^{\circ}42.9^{\circ}$ Z_{Sat} $58.3^{\circ}36.3^{\circ}$ $58.3^{\circ}45.5^{\circ}$ $58.3^{\circ}49.1^{\circ}$	$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	86.5°142.8°	77.4°156.6°	72.7°170.4°				
Z_{Sat} 58.3°36.3° 58.3°45.5° 58.3°49.1°	$A_{\mathbf{S}}$	50.0°32.2°	50.0°–39.9°	50.0°42.9°				
	Z_{Sat}	58.3°36.3°	58.3°45.5°	58.3°49.1°				

Продовження таблиці

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

Пологолини	Значення параметрів						
Параметри	Т _{вв} = 21 год 30 хв	T _{BB} = 22 год 30 хв	T _{BB} = 23 год 30 хв				
A _{Sat}	8.3°188.3°	8.8°188.8°	9.1°189.1°				
ΔL , KM	19.99.2	19.911.9	19.913.5				
ΔS , км	0.092.6	0.097.5	0.099.6				
Z_{\odot}	80.0°	80.0°	80.0°				
A_{\odot}	155.8°	170.8°	185.0°				
ϕ_P	53.3°	56.1°	56.4°				
λ_P	22.9°	24.3°	24.5°				
$\Theta_{\min}\Theta_{\max}$	55.2°142.7°	47.6°156.1°	42.8°168.8°				
A _{Scn}	50.0°60.0°	50.0°60.0°	50.0°60.0°				
Z_{Sat}	58.3°74.0°	58.3°74.0°	58.3°74.0°				
A _{Sat}	13.6°193.6°	14.6°194.6°	14.8°194.8°				
ΔL , км	19.956.9	19.956.9	19.956.9				
ΔS , км	0.0102.5	0.095.7	0.094.8				

Закінчення таблиці

Позначення. $T_{\rm BB}$ — місцевий середній сонячний час проходження супутником висхідного вузла орбіти на екваторі, Z_{\odot} , A_{\odot} — зенітна відстань і азимут Сонця у спостережуваній приладом «СканПол» ділянці земної поверхні, що відраховується від місцевого напрямку на північ через схід, φ_p — широта спостережуваної ділянки, λ_p — початкова довгота спостережуваної ділянки, тобто миттєвого положення центра поля зору «СканПол» при першому спостереженні приладом цієї ділянки, Θ_{\min} , Θ_{\max} — мінімальне і максимальне значення кута розсіювання у спостережуваній ділянці земної поверхні для усього діапазону кута сканування, що відраховується від напряму у надир в діапазоні від +50° (уперед) до -60° (назад), A_{Sen} , Z_{San} , ΔL та ΔS — відповідні до Θ_{\min} , Θ_{\max} значення кута сканування, зенітні відстані та азимути супутника для спостережуваної приладом «СканПол» ділянки земної поверхні (азимут відраховується від місцевого напрямку на північ через схід), довжина дуги на земній поверхні (уздовж підсупутникової траси, що відповідні до відає миттєвому полю зору «СканПол») та зміщення спостережуваної ділянки на земній поверхні (уздовж паралелі відносно підсупутникової траси протягом часу сканування від кута +50°).

усього діапазону кута сканування і відповідні їм значення кута сканування та зенітні відстані й азимути Сонця й супутника відносно спостережуваної ділянки. Заради наочності діапазон і характер змін кутів розсіювання у процесі сканування для кожного із зазначених випадків показано на рис. 5.

Як і слід очікувати, граничні широти спостережуваної приладом «СканПол» частини атмосфери й земної поверхні змінюються протягом року унаслідок зміни схилення Сонця. У період від весняного до осіннього рівнодення більшість вимірювань буде виконано над північною півкулею, тоді як у іншу частину року — над південною. При цьому діапазон широт спостережуваних приладом «СканПол» ділянок буде дещо різним для орбіт з різним часом проходження вузла орбіти. Як видно із таблиці, близько дня літнього сонцестояння спостережувані ділянки на земній поверхні, для яких зенітні кути Сонця для орбіти з $T_{\rm BB} = 21$ год 30 хв змінюються від 80° (максимальне прийняте тут значення Z_{\odot}) до приблизно 30.5° (мінімальне значення Z_{\odot} для орбіти із зазначеним Т_{вв}), розташовані на широтах від 81.9° Пн (найвища широта точки на підсупутниковій трасі для орбіти з нахилом 98.1°), до приблизно 36.8° Пн, тоді як довготи будуть у діапазоні від 176.3° до 16.9° відповідно. Для орбіти з $T_{\rm BB} = 23$ год 30 хв у цей же день зенітні кути Сонця змінюватимуться від 80° до 5°, зазначені широти будуть у діапазоні від 81.9° до приблизно 27° на північ від екватора, а довготи — відповідно від 166.5° до 14.2°. Поблизу рівнодень для орбіти з $T_{\rm BB} = 21$ год 30 хв цей діапазон широт



Рис. 5. Зміни кутів розсіювання Θ у процесі сканування приладом «СканПол» уздовж підсупутникової траси у різні сезони та при різних значеннях зенітної відстані Сонця *Z*⊙ (числа біля кривих): *a* − *T*_{BB} = 21 год 30 хв, *б* − *T*_{BB} = 22 год 30 хв, *в* − *T*_{BB} = 23 год 30 хв

становитиме приблизно від 80°Пн до 10°Пн (при мінімальному $Z_{\odot} \approx 35.5^{\circ}$), діапазон довгот — від 67.3° до 10.3°, а для орбіти з $T_{\rm BB} = 23$ год 30 хв — приблизно від 78°Пн ($Z_{\odot} = 80^{\circ}$) до 3.3°Пн (при мінімальному $Z_{\odot} \approx 6^{\circ}$) при довготах 55.8° та 8.9° відповідно. Поблизу дня зимового сонцестояння для орбіти з $T_{\rm BB} = 21$ год 30 хв спостерігатимуться ділянки у діапазоні широт від 55.3°Пн ($Z_{\odot} = 80^{\circ}$) до 22.3°Пд ($Z_{S} = 37.2^{\circ}$) з довготами від 22.9° до 3.3°, для орбіти з $T_{\rm BB} = 23$ год 30 хв широти становитимуть від 56.4°Пн ($Z_{\odot} = 80^{\circ}$) до 19.8° Пд ($Z_{\odot} = 10^{\circ}$), і відповідні широт спостережуваних ділянок буде найширший для орбіти з $T_{\rm BB} = 23$ год 30 хв,

а спостережувані ділянки для орбіти з $T_{\rm BB}$ = 22 год 30 хв будуть розташовуватись у межах зазначених вище діапазонів (див. табл.).

Діапазон спостережуваних кутів розсіювання визначається зенітними відстанями Сонця й супутника для спостережуваної ділянки атмосфери й земної поверхні на час вимірювань, і тому також залежить від $T_{\rm BB}$ супутника. З аналізу наведених у таблиці значень Z_{\odot} на відповідні дати випливають такі закономірності змін діапазонів кутів розсіювання. Перш за все очевидно, що для усіх розглянутих тут $T_{\rm BB}$ і дат діапазон кутів розсіювання найбільший при великих зенітних відстанях Сонця, і найменший — при мінімаль-

них, і це зменшення відбувається нелінійно за рахунок малих кутів розсіювання. Так, для орбіти з $T_{\rm BB} = 21$ год 30 хв на 21 червня Θ змінюється у межах приблизно від 51° до 149.5° при $Z_{\odot} = 80^{\circ}$ та від 107° до 149.7° — при мінімальному значенні $Z_{\odot} = 30.5^{\circ}$, і мінімальний кут розсіювання при цьому зростає більш як удвічі, тоді як максимальний практично не змінюється. Для орбіти з $T_{\rm BB}=23$ год 30 хв при зміні зенітного кута Сонця від $Z_\odot=80^\circ$ до мінімального $Z_\odot=5^\circ$ діапазон кута розсіювання змінюється від $\Theta \approx 42^{\circ}...173^{\circ}$ до $\Theta \approx 109^\circ...176^\circ$. Ці закономірності у змінах Θ для зазначених діапазонів зенітних кутів Сонця зберігаються протягом усього року, і діапазони кутів розсіювання поблизу літнього сонцестояння для північної півкулі на кілька градусів більші, ніж поблизу зимового. Крім того, діапазони кутів розсіювання для орбіти з $T_{\rm BB} = 23$ год 30 хв у всіх розглядуваних тут випадках найбільші (див. таблицю і рис. 5). З наведених результатів випливає, зокрема, що у найбільших діапазонах кутів розсіювання сонячного світла поверхнею й атмосферою Землі вимірювання приладом «СканПол» будуть виконуватись переважно у зонах високих і помірних широт (приблизно 53° Пн...82° Пн).

Важливою обставиною є співвідношення між діапазонами кутів розсіювання вимірюваних приладом «СканПол» потоків сонячного світла і розсіювальними характеристиками аерозольних частинок, фізичні властивості яких визначаються шляхом розв'язування відповідної оберненої задачі. Як випливає з результатів моделювання кутового розподілу інтенсивності та стану поляризації випромінювання, розсіяного аерозольними частинками [11], фазова функція та ступінь поляризації світла, розсіяного частинками різної форми і розмірів, проявляють найбільшу чутливість до значення комплексного показника заломлення у діапазоні кутів розсіювання приблизно 40°...180°, причому ця чутливість більша при більших кутах розсіювання. Це означає, що загалом прилад «СканПол» на зазначеній вище орбіті буде здійснювати вимірювання у діапазоні кутів розсіювання сонячного світла земною атмосферою та поверхнею, які забезпечують можливості для визначення оптичних і мікрофізичних характеристик аерозольних частинок. Але при цьому перевагу має орбіта з часом проходження висхідного вузла, близьким до місцевої півночі для заданої його довготи (відповідно час проходження нисхідного вузла буде близьким до місцевого полудня), оскільки у цьому випадку діапазон кутів розсіювання буде найбільшим.

Проте у таблиці наведено й інші параметри, що характеризують умови вимірювань приладом «СканПол» розсіяного світла. Широта і довгота спостережуваної ділянки дають уявлення про її географічне розташування для оцінювання найімовірнішого типу аерозольних частинок. Кут сканування А_{Scn} показує, під яким кутом відносно надира спостерігається ділянка атмосфери й земної поверхні, що необхідно для оцінювання потоку світла на вхідній апертурі приладу. Окремо варто розглянути зміни лінійних розмірів ΔL спостережуваної ділянки земної поверхні та приземної атмосфери уздовж підсупутникової траси (тобто у напрямку сканування) з перебігом сканування та її зміщення уздовж паралелі унаслідок обертання Землі (тобто зміна довготи) ΔS . При кутовому діаметрі поля зору телескопів «СканПол» 0.5° [4, 24] довжина ділянки земної поверхні уздовж підсупутникової траси у надирі становить $\Delta L \approx 6$ км, але при куті сканування $A_{Scn} = 50^{\circ} \Delta L \approx 20$ км, а при $A_{Scn} = -60^{\circ} \Delta L \approx 57$ км (таблиця) з урахуванням кривини земної поверхні. При цьому потрібно ще враховувати й значну швидкість переміщення спостережуваної поверхні у полі зору «СканПол», пов'язану з обертанням сканувальних дзеркал та часом експонування приладом вхідного потоку світла. Нескладно оцінити, що при зазначеному періоді обертання 1.5 с за час експонування 1 мс напрямок миттєвого поля зору приладу «Скан-Пол» зміститься приблизно на 0.24°, тобто майже на половину номінальної роздільної здатності приладу. Тому насправді до наведених у таблиці значень ΔL потрібно ще додати й величину, відповідну до часу експонування. У випадку 1 мс величина ΔL збільшиться майже у півтора рази, причому вона практично не буде скомпенсована переміщенням підсупутникової точки зі швидкістю 6.8 км/с у протилежному напрямку.

Крім того, оскільки сканування однієї ділянки у всьому діапазоні кутів 110° триває приблизно 6 хв, то за цей час її довгота зміниться приблизно на 1.55°, що відповідає зміщенню земної поверхні уздовж паралелі: на екваторі $\Delta S \approx 172$ км, тоді як у полярних широтах — значно менше, наприклад $\Delta S \approx 24.5$ км при $\phi = 82^{\circ}$. Це означає, що справжня просторова роздільна здатність приладу «СканПол» істотно змінюється залежно від кута сканування та від широти спостережуваних ділянок на земній поверхні і у атмосфері. Як показують дослідження за допомогою наземних дистанційних засобів, таких як сонячні фотометри мережі AERONET та лідари, вміст і характеристики аерозольних частинок над місцем спостережень не змінюються істотно протягом кількох десятків хвилин, а діаметр атмосферного стовпа, у якому усереднюються дані сонячних фотометрів, становить 5...10 км протягом дня, залежно від розподілу аерозолів з висотою [16, 18]. Але під час так званих «особливих подій», пов'язаних або зі значним надходженням аерозолів у атмосферу поблизу місця спостережень, або з перенесенням його з віддалених регіонів атмосферними потоками, вміст частинок над місцем спостережень змінюється доволі швидко (менш ніж за годину) у кілька разів, що свідчить про значну просторову неоднорідність концентрації частинок у атмосфері [15]. З огляду на значну кількість і різноманітність джерел надходження аерозольних частинок у атмосферу та механізмів видалення і пов'язану з цим різноманітність їхніх фізичних параметрів і оптичних характеристик [7, 14, 27], є підстави очікувати значної неоднорідності у просторовочасовому розподілі частинок як за концентрацією, так і за характеристиками. Спеціальні дослідження мезомасштабних просторово-часових неоднорідностей у розподілі аерозолів, виконані за допомогою різноманітних засобів (наземні станції з нефелометрами, лідар супутникового базування, нефелометр на літаку) у різних регіонах земної кулі [6] також показали, що вміст і параметри аерозолів можуть змінюватися у широкому діапазоні: від кількох кілометрів до приблизно 200 км. З іншого боку, обмеженість просторової роздільної здатності супутникових

приладів для дослідження аерозолів та вплив інших супутніх чинників (характеристики земної поверхні, хмарність) теж накладають обмеження на детальність досліджень просторово-часової динаміки аерозолів. Так, номінальна просторова роздільна здатність даних вимірювань з приладом MODIS, ряди яких охоплюють проміжок часу більш як 15 років і є одним з найповніших джерел даних про розподіл аерозолю в атмосфері у глобальному масштабі, становить 10 × 10 км у надирі, але зростає до 48 × 20 км на краях поля зору [22]. Просторове усереднення даних приладу POLDER, який виконував вимірювання більше 10 років, у підсумку становить 20 × 20 км [29], а дані супутникового лідара CALIOP усереднюються уздовж підсупутникової траси на відрізках у 5, 20 або 80 км залежно від умов вимірювань [19, 30]. Отже, результати вимірювань з приладом «СканПол» загалом можуть бути використані для оцінювання просторового розподілу аерозольних частинок у атмосфері за концентрацією та характеристиками при їхньому мезомасштабному усередненні, як і дані зазначених вище приладів.

висновки

У роботі отримано оцінки діапазону кутів розсіювання сонячного випромінювання у найнижчих шарах земної атмосфери та земною поверхнею, що можуть спостерігатися приладом «СканПол» проєкту «Аерозоль-UA» з сонячносинхронної приполярної орбіти висотою 705 км і нахилом 98.1°. Цей діапазон залежить від часу проходження супутником площини земного екватора, тому для оцінки такої залежності обчислення зазначених кутів розсіювання зроблені для цієї орбіти при трьох моментах перетину супутником висхідного вузла на екваторі з довготою 200°: 21 год 30 хв, 22 год 30 хв і 23 год 30 хв місцевого середнього сонячного часу. Отримані оцінки кутів розсіювання при кожній з трьох реалізацій орбіти для точок на земній поверхні, де зенітна відстань Сонця становить 80°, 50°, та мінімально можлива для кожної реалізації орбіти на дати поблизу літнього і зимового сонцестоянь (21 червня і 21 грудня) та рівнодення (21 вересня) 2020 р. Як очевидно для такої орбіти, у пері-

од від весняного до осіннього рівнодення більша частина вимірювань буде виконуватись над північною півкулею, тоді як у іншу частину року над південною. З одержаних результатів і їхнього аналізу випливає, що діапазон кутів розсіювання найбільший при найбільшій зенітній відстані Сонця (тут прийнято 80°), яка настає у приполярних широтах північної півкулі у період від весняного до осіннього рівнодення, і у середніх широтах у іншу частину року. Цей максимальний діапазон становить приблизно 51°...149.5° для орбіти з $T_{\rm BB} = 21$ год 30 хв та 42°...173° для орбіти з $T_{\rm BB} = 23$ год 30 хв, а мінімальний діапазон кутів розсіювання (при мінімальних зенітних відстанях Сонця) становить приблизно 107°...150° та 109°...176° для зазначених Т_{вв} відповідно. Зменшення діапазонів відбувається з боку малих кутів розсіювання.

З аналізу модельних даних випливає, що залежність вимірюваних характеристик аерозолів (фазова функція і ступінь поляризації) від показника заломлення частинок найбільша при кутах розсіювання приблизно від 40 до 180°, і зростає зі збільшенням кутів у цьому діапазоні. З порівняння діапазонів кутів розсіювання, спостережуваних приладом «СканПол», з модельними даними можна зробити висновок, що вимірювання з приладом «СканПол» на сонячно-синхронній приполярній орбіті відповідають необхідним вимогам для визначення мікрофізичних і оптичних характеристик аерозольних частинок. При цьому спостережуваний діапазон кутів розсіювання найбільший для орбіти з місцевим часом, близьким до полудня, що у випадку орбіти з розглянутим тут нахилом приблизно 98° відповідає часові проходження висхідного вузла на екваторі приблизно від 22 год 30 хв до 24 год 00 хв.

Унаслідок орбітального руху супутника лінійні розміри спостережуваної ділянки земної поверхні уздовж підсупутникової траси без урахування переміщення за рахунок обертання сканувальних дзеркал змінюються приблизно від 6 км у надирі до майже 60 км при найбільшому куті сканування 60°. Насправді ця величина також істотно залежить від часу експонування приладом вхідного потоку світла. Якщо припустити, що час експонування становить приблизно 1 мс, то ΔL збільшиться майже у півтора рази. Також унаслідок обертання Землі зменшується довгота спостережуваної ділянки приблизно на 1.55°, що відповідає її лінійному зміщенню уздовж паралелі від $\Delta S \approx 172$ км на екваторі до $\Delta S \approx 24.5$ км при $\phi = 82^{\circ}$. Це обмежує просторову роздільну здатність приладу «СканПол», і тому результати вимірювань з ним загалом можуть бути використані для оцінювання просторового розподілу аерозольних частинок у атмосфері за концентрацією та характеристиками при їхньому мезомасштабному усередненні.

Автор висловлює подяку рецензентам за цінні зауваження і поради, а також співробітникам відділу атмосферної оптики та приладобудування ГАО НАН України за критичне оцінювання роботи і плідні дискусії.

REFERENCES

- 1. Abalakin V. K. (1979). Basics of the ephemerides astronomy. Moscow: Nauka [in Russian].
- 2. Ambartsumian V. A., Mustel E. P., Severny A. B., Sobolev V. V. (1952). Theoretical astrophysics. Moscow [in Russian].
- 3. Duma D. P. (2007). General astrometry. Kyiv: Naukova Dumka [in Ukrainian].
- 4. Syniavskyi I. I., Milinevsky G. P., Ivanov Yu. S., Sosonkin M. G., Danylevsky V. O., Rosenbush V. K., Bovchaliuk A. P., Lukenyuk A. A., Shymkiv A. P., Mishchenko M. I. (2015). Metodology, hardware implementation, and validation of satellite remote sensing of atmospheric aerosols: first results of the Aerosol-UA space experiment development. *Space Science and Technology*, 23, № 3, 9–17 [in Ukrainian].
- 5. Yatskiv Ya. S., Mishchenko M. I., Rosenbush V. K., Shakhovskoy D. N., Sinyavsky I. I., Milinevsky G. P., Kiselev N. N., Ivanov Yu. S., Petukhov V. N., Danylevsky V. O., Bovchalyuk A. P. (2012). Satellite project "AEROSOL-UA": remote sensing of aerosols in the Earth's atmosphere. *Space Science and Technology*, 18, № 4, 3–15 [in Russian].
- Anderson T. L., Charlson R. J., Winker D. M., Ogren J. A. Holmén K. (2003). Mesoscale Variations of Tropospheric Aerosols. J. Atmos. Sci., 60, 119–136.
- 7. Boucher O., Randall D., Artaxo P., Bretherton C., Feingold G., Forster P., Kerminen V.-M., Kondo Y., Liao H., Lohmann U., Rasch P., Satheesh S. K., Sherwood S., Stevens B., Zhang X. Y. (2013). Clouds and Aerosols. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. T. F. Stocker et al. Cambridge, New York: Cambridge Univ. Press.
- 8. Capderou M. (2005). Satellites Orbits and Missions. Springer-Verlag France.
- 9. Dubovik O., Holben B., Eck T. F., Smirnov A., Kaufman Y. J., King M. D., Tanré D., Slutsker I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *J. Atmos. Sci.*, **59**, 590–608.
- Dubovik O., Li Z., Mishchenko M. I., Tanré D., Karol Y., Bojkov B., Cairns B., Diner D. J., Espinosa W. R., Goloub P., Gu X., Hasekamp O., Hong J., Hou W., Knobelspiesse K. D., Landgraf J., Li L., Litvinov P., Liu Y., Lopatin A., Marbach T., Maring H., Martins V., Meijer Y., Milinevsky G., Mukai S., Parol F., Qiao Y., Remer L., Rietjens J., Sano I., Stammes P., Stamnes S., Sun X., Tabary P., Travis L. D., Waquet F., Xu F., Yan C., Yin D. (2019). Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: Instruments, methodologies, results, and perspectives. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat. Transfer.*, 224, 474–511.
- Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B. N., Mishchenko M., Yang P., Eck T. F., Volten H., Muñoz O., Veihelmann B., van der Zande W. J., Leon J.-F., Sorokin M., Slutsker I. (2006). Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. *J. Geophys. Res.*, **111**, D11208.
- Dubuisson P., Roger J. C., Mallet M., Dubovik O. (2006). A code to compute the direct solar radiative forcing: Application to anthropogenic aerosols during the escompte experiment. International Radiation Symposium (IRS 2004) on Current Problems in Atmospheric Radiation. (Eds. H. Fischer, B.-J. Sohn, A. Deepak). Hampton, 127–130.
- 13. Seidelmann P. K. (Ed.). (1992). *Explanatory supplement to the astronomical almanac*: University Science Books. California: Mill Valley,
- 14. Forster P., Ramasvamy V., Artaxo P., Bernsten T., Betts R., Fahey D. W., Haywood J., Lean J., Lowe D. C., Myhre G., Nganga J., Prinn R., Raga G., Shulz M., Dorland R. V. (2007). Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. S. Solomon et al. Cambridge and New York: Cambridge Univ. Press.
- 15. Galytska E., Danylevsky V., Hommel R., Burrows J. P. (2018). Increased aerosol content in the atmosphere over Ukraine during summer 2010. *Atmos. Meas. Tech.*, **11**, 2101–2118.
- 16. Giles D. M., Sinyuk A., Sorokin M. G., Schafer J. S., Smirnov A., Slutsker I., Eck T. F., Holben B. N., Lewis J. R., Campbell J. R., Welton E. J., Korkin S. V., Lyapustin A. I. (2019). Advancements in the Aerosol Robotic Network (AERONET) Version 3 database automated near-real-time quality control algorithm with improved cloud screening for Sun photometer aerosol optical depth (AOD) measurements. *Atmos. Meas. Tech.*, **12**, 169–209.
- 17. Hansen J., Travis L. D. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. Space Sci. Rev., 16, 527-610.
- Holben B., Eck T., Slutsker I., Tanré D., Buis J., Setzer A., Vermote E., Reagan J., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. (1998). AERONET — a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, 66, 1–16.
- Kacenelenbogen M., Vaughan M. A., Redemann J., Hoff R. M., Rogers R. R., Ferrare R. A., Russell P. B., Hostetler C. A., Hair J. W., Holben B. N. (2011). An accuracy assessment of the CALIOP/CALIPSO version 2/version 3 daytime aerosol extinction product based on a detailed multi-sensor, multi-platform case study. *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 3981–4000.
- 20. Kaufman Y. J. (1993). Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance. J. Geophys. Res., 98 (D2), 2677–2692.
- Lacis A., Mishchenko M. (1995). Climate forcing, climate sensitivity, and climate response: A radiative modeling perspective on atmospheric aerosols. *Aerosol Forcing of Climate*. Eds. R. J. Charlson, J. Heintzenberg. Jon Wiley&Sons Ltd., 11–42.
- 22. Levy R. C., Mattoo S., Munchak L. A., Remer L. A., Sayer A. M., Patadia F., Hsu N. C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmos. Meas. Tech.*, **6**, 2989–3034.
- Ma X., F. Yu, Luo G. (2012). Aerosol direct radiative forcing based on GEOS-Chem-APM and uncertainties. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 5563–5581.
- Milinevsky G., Yatskiv Ya., Degtyaryov O., Syniavskyi I., Mishchenko M., Rosenbush V., Ivanov Yu., Makarov A., Bovchaliuk A., Danylevsky V., Sosonkin M., Moskalov S., Bovchaliuk V., Lukenyuk A., Shymkiv A., Udodov E. (2016). New satellite project Aerosol-UA: Remote sensing of aerosols in the terrestrial atmosphere. *Acta Astronautica*, 123, 292–300.
- Mishchenko M. I., Cairns B., Kopp G., Schueler C. F., Fafaul B. A., Hansen J. E., Hooker R. J., Itchkawich T., Maring H. B., Travis L. D. (2007). Accurate monitoring of terrestrial aerosols and total solar irradiance: introducing the Glory Mission. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 88, 677–691.
- Myhre G., Stordal F., Bergelen T. F., Sundet J. K., Isaksen I. S. A. (2004). Uncertainties in the radiative forcing due to sulfate aerosols. J. Atmospheric Sci., 61 (5), 485–498.
- 27. Penner J. E., Andreae M., Annegarn H., Barrie L., Feichter J., Hegg D., Jayaraman A., Leaitch R., Murphy D., Nganga J., Pitari G. (2001). Aerosols, their Direct and Indirect Effects. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Work*-

ing Groupe I Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. J. T. Houghton, et al. Cambridge and New York: Cambridge Univ. Press.

- 28. Standish E. M. (1998). JPL planetary and lunar ephemerides. DE405/LE405, JPL IOM 312.F-98-048.
- 29. Su X., Goloub P., Chiapello I., Chen H., Ducos F., Li Z. (2010). Aerosol variability over East Asia as seen by POLDER space-borne sensors. *J. Geophys. Res.*, **115**, D24215.
- Young S. A., Vaughan M. A. (2009). The retrieval of profiles of particulate extinction from Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations (CALIPSO) data: Algorithm description. J. Atmos. and Oceanic Technol., 26, 1105–1119.

Received 07.11.2019

V. O. Danylevsky Senior Researcher, Ph. D. E-mail: vdanylevsky@gmail.com, vdan@observ.univ.kiev.ua

Astronomical observatory of the Taras Shevchenko National University of Kyiv

3 Observatorna Str., Kyiv, 04053 Ukraine

Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine

27 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143 Ukraine

ANGULAR PROPERTIES OF THE SOLAR LIGHT SCATTERING IN THE TERRESTRIAL ATMOSPHERE OBSERVED BY THE SCANPOL INSTRUMENT OF THE AEROSOL-UA PROJECT

Angular characteristics of solar light scattering in the Earth's atmosphere and parameters of the atmosphere volume and the surface part observed by the ScanPol instrument of the "Aerosol-UA" project are estimated in order to determine properties of aerosol particles from a satellite orbit. Estimations were obtained for the scattering angles ranges in the lower troposphere which can be observed by the ScanPol instrument from the polar sun-synchronous orbit with altitude 705 km and inclination 98.1° crossing the ascending knot on the equator at $21^{h}30^{m}$, $22^{h}30^{m}$, and $23^{h}30^{m}$ of local mean solar time. The estimations of the scattering angles were obtained at each of the orbit realizations for sites on the Earth's surface, were the zenith angle of the Sun is 80° , 50° , and minimal one for each of the orbit realizations. The calculations were performed for the dates of 2020 close to the summer solstice, the autumnal equinox, and the winter solstice (namely 21 June, 21 September, and 21 December, respectively). The scattering angles range was computed for the range of the ScanPol scanning angles equal to 110° along the sub-satellite trace. The range of scattering angles is maximal at the maximal zenith angle of the Sun equal to 80°, which occurs at the north hemisphere for the scene located at polar north latitudes during the period between the spring and the autumnal equinoxes and in the middle latitudes during the rest of a year. The maximal range of scattering angles is approximately 51.1°...149.5° close to the summer solstice for the satellite orbit with local time of crossing the ascending node (T_{BB}) equal to $21^{h}30^{m}$ and $41.9^{\circ}...172.9^{\circ}$ for the orbit with $T_{BB} = 23^{h}30^{m}$. The minimal range of scattering angles occurs at minimal zenith angles of the Sun close to the winter solstice and takes on the values approximately $103.2^{\circ}...142.8^{\circ}$ and $108.2^{\circ}...170.4^{\circ}$ at mentioned T_{BB} , respectively. For the rest of the zenith angles of the Sun, the range of scattering angles takes on the intermediate values. The range of scattering angles decreased mainly at the cost of small scattering angles. In summary, the range of observed scattering angles is maximal for the orbit with local time close to the noon, to be precise at $T_{\rm RR}$ between $22^{h}30^{m}$ and $24^{h}00^{m}$ for the orbit with inclination assumed here. Comparison of the ranges of scattering angles observed by the ScanPol instrument and data of simulations showed that measurements by the ScanPol from the considered orbit allow us to retrieve microphysical and optical properties of aerosol particles. Linear size of the scene observed by instrument along the sub-satellite trace increases during the scanning process from approximately 6 km at nadir to almost 60 km at maximal scattering angle equal to 60°, and simultaneously the longitude of the observed scene decreases by 1.55° that corresponds to linear shift along the parallel from $\Delta S \approx 172$ km on the equator to $\Delta S \approx$ \approx 24.5 km on the latitude 82°. That is why data measured by the ScanPol can be used after mesoscale averaging.

Keywords: the Earth's atmosphere, optics of the atmosphere, remote sensing, aerosols, scattering of the solar light.

Космічна геоінформатика та геодезія

Space Geoinformatics and Geodesy

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.075 УДК: 502.4:528.9

Т. П. ФЕДОНЮК¹, старш. наук. співроб., д-р с.-г. наук, кер. навч.-наук. центру екології та охорони навколишнього середовища E-mail: tanyavasiluk2015@gmail.com О. М. ГАЛУЩЕНКО², директор Т. В. МЕЛЬНИЧУК², заст. директора з наук. роботи та міжнародної співпраці О. В. ЖУКОВ 3, проф., д-р біол. наук Д. О. ВИШНЕВСЬКИЙ², зав. наук. відділу А. А. ЗИМАРОЄВА¹, доцент, канд. біол. наук В. В. ГУРЕЛЯ¹, в. о. зав. кафедри геодезії та землеустрою, канд. с.-г. наук ¹ Поліський національний університет бульвар Старий 7, Житомир, Україна, 10008 ²Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник вул. Толочина 28, смт. Іванків, Київська обл., Україна, 07201 вул. Преображенська 25, Київ, Україна, 03110 ³ Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького вул. Гетьманська 20, Мелітополь, Україна, 72300

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ОСНОВНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ БІОЛОГІЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ (НА ПРИКЛАДІ ЧОРНОБИЛЬСЬКОГО РАДІАЦІЙНО-ЕКОЛОГІЧНОГО БІОСФЕРНОГО ЗАПОВІДНИКА)

Роботу присвячено обґрунтуванню концептуальної моделі застосування ГІС-технологій у діяльності об'єктів природнозаповідного фонду (на прикладі Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника).

Необхідність застосування ГІС-технологій у Чорнобильському радіаційно-екологічному біосферному заповіднику зумовлена: великою площею об'єкту, складністю техногенної обстановки (радіаційним забрудненням) та відсутністю єдиної бази даних за роки, що передували створенню заповідника. Тому створення геопорталу Заповідника є важливою передумовою проведення комплексного динамічного моніторингу стану території та біорізноманіття. Структурна схема створення та використання компонентів просторової бази даних заповідника складається із трьох блоків: блок наповнення даних (атрибутивна інформація), блок обробки отриманої інформації (шари наповнення) та блок використання інформації (картографічний матеріал). На даний час нами створено основу геопорталу Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника, подальше наповнення якого передбачає налагоджений процес збору даних за основними запропонованими тематичними блоками: геологічна будова, рельєф, клімат, водні об'єкти, ґрунти, рослинний покрив, тваринний світ, землеустрій, екологія, ландшафтна структура. Геопортал є центральною платформою природно-географічної та пов'язаної із нею інформації, яка буде ключовим рушієм та підставою для обґрунтування управлінських рішень у сфері оцінки впливів на довкілля, при виділенні зон особливого контролю, окреслення масивів особливого наукового, охоронного чи іншого інтересу, планування об'єктів моніторингу, пробних ділянок, коридорів міграції об'єктів тваринного світу тощо.

Ключові слова: геопортал, ГІС-технології, Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник, стратегія, концепція, природоохоронні об'єкти, біорізноманіття.

Цитування: Федонюк Т. П., Галущенко О. М., Мельничук Т. В., Жуков О. В., Вишневський Д. О., Зимароєва А. А., Гуреля В. В. Перспективи та основні аспекти застосування ГІС-технологій для моніторингу біологічного різноманіття (на прикладі Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника). *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 6 (127). С. 75–93. https://doi.org/10.15407/knit2020.06.075

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Практики Європейського союзу та США передбачають широке залучення геоінформаційних технологій у заповідну справу [14, 23]. Обов'язкове використання геоінформаційних систем (ГІС) при розробці проектів створення нових об'єктів природно-заповідного фонду (ПЗФ) передбачене і законодавством України. Застосування геоінформаційного забезпечення значно підвищує ефективність територіального аналізу при встановленні меж нових об'єктів, здійсненні вилучення земель, розробці попереднього функціонального зонування території тощо. В Україні чинними нормативно-правовими документами не регламентовані прийоми впровадження геоінформаційних технологій у процес функціонування природоохоронних територій. Системи геоінформаційного забезпечення проектування, створення та подальшої діяльності природоохоронних територій потребують систематизації підходів та методик [2].

З загальних позицій зона відчуження є епіцентром аварії на ЧАЕС. Ця аварія визнається експертами як найбільша в історії ядерної енергетики. У межах зазначеної зони радіаційний вплив катастрофи на навколишнє середовище і людину досяг максимально небезпечних значень. Тому було проведено безпрецедентну за масштабами мирного часу евакуацію населення, згорнуто господарську діяльність, закрито промислові та сільськогосподарські підприємства. З території зони відчуження в межах України були евакуйовані мешканці 74 населених пунктів зокрема міста Прип'ять та Чорнобиль. Пізніше, після уточнення радіаційної обстановки, було розпочато поступове відселення жителів з населених пунктів, розташованих переважно на захід від зони відчуження — з зони безумовного (обов'язкового) відселення. Тут проведено повне виселення із 48, часткове — із 37 населених пунктів.

На території ЗВіЗБ(О)В виконуються такі завдання: виведення з експлуатації ЧАЕС, поводження з радіоактивними відходами, забезпечення бар'єрної функції ландшафтів у нерозповсюдженні радіонуклідів, підтримання території у безпечному стані та забезпечення інфраструктури. Разом з тим вся антропогенна діяльність зосереджена на площі 5...10 % від загальної території Зони. На всій іншій території, після гострої фази ліквідації аварії (1986—1988 рр.), розпочалися процеси відтворення природних комплексів. З'явилося «вікно можливостей» використання цієї території для збереження та відновлення біорізноманіття, створення екосистемних послуг.

Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник був створений у 2016 році у межах зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення (ЗВіЗБ(О)В). Площа ЗВіЗБ(О)В становить 2600 км², Заповідника приблизно 2000 км².

Проблемою заповідника є фрагментарність інформації про особливості перетворення антропогенних ландшафтів у природні, адже з 1986 по 2016 рр. вся наукова діяльність була направлена переважно на дослідження радіаційної ситуації. Таким чином, застосування ГІС-технологій у нашому випадку зумовлене: великою площею об'єкта, складністю техногенної обстановки (радіаційне забруднення) та відсутністю єдиної бази даних за роки, що передували створенню заповідника.

Альтернативним шляхом відновлення першочергових даних є космічні знімки території, що були зроблені до аварії. У перспективі моніторинг біологічного різноманіття та стану екосистем на території заповідника надасть змогу відслідковувати екосистемні зміни у динаміці, якщо буде відбуватися фіксація, збереження та візуалізація просторово координованих даних та буде проводитися просторовий аналіз екологічних даних.

Використання ГІС-об'єктами природно-заповідного фонду відіграє важливу роль в упорядкуванні інформації у дослідженнях біологічного різноманіття та екологічного стану природоохоронних територій. Їхнє використання необхідне для вирішення проблем управління якістю навколишнього середовища. ГІС є потужним інструментом для автоматизації процесу моніторингу довкілля. Геоінформаційні системи відкривають нові перспективи для переходу наукових досліджень на новий рівень [35], коли будуть

поєднані модельні зображення території (цифрові відображення карт, схем, космічних та аерозображень) [24, 32] з інформаційними базами даних (наприклад, дані щодо біорізноманіття, ґрунтових умов, гідрологічної мережі щільності забруднення радіонуклідами, пожежонебезпечність лісів тощо) [22, 28]. Карти земного покриву відіграють важливу роль для осмислення динаміки екосистем та розв'язання багатьох задач моніторингу біологічного різноманіття [20, 35]. Дистанційне зондування поверхні Землі дозволяє адекватно вирішувати задачі аналізу кліматичних змін [21]. Імплементація геоінформаційних систем надає можливість збору, відслідковування, зберігання, аналізу та відображення географічних даних та дозволить приймати надскладні рішення щодо управління заповідником із врахуванням сукупності факторів та умов. Методи дистанційного зондування забезпечують постійний і систематичний моніторинг параметрів рослинного покриву та екосистем і відіграють все більшу роль в оцінці продуктивності рослинного покриву [22].

Нині геоінформаційні системи і технології широко впроваджуються та застосовуються у природоохоронній діяльності, вони значно змінюють можливості та характер наукової та дослідницької роботи, а також впливають на процеси прийняття виважених рішень в управлінні об'єктами природно-заповідного фонду (ПЗФ). Ефективність ГІС-технологій визначається вже під час проектування та обґрунтування актуальності й необхідності створення нових об'єктів природо-заповідного фонду, проведення зонування територій об'єктів заповідання. ГІС-технології дозволяють розв'язати низку проблем, які виникають під час моніторингу навколишнього середовища, раціональному використанні природних ресурсів, еколого-просвітницькій та виховній діяльності, формуванні баз даних, їхньому просторовому аналізі, а також під час організації екологічного, наукового та зеленого туризму в межах об'єктів природоохоронного значення. В основі геоінформаційних систем лежать просторові бази даних. Вони формуються на основі фундаментальних теоретико-методичних та технологічних положень, які більш детально описуються у багатьох наукових працях [4, 18, 25, 36].

МЕТОДИ ТА МЕТОДИКИ ОПРАЦЮВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

Враховуючи загальні підходи до формування геоінформаційних систем та їхніх просторових баз даних, суті задач, що ставляться до природоохоронних територій, а також управлінських потреб, просторові бази даних Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника створювали, спираючись на об'єктнореляційні моделі даних та їхньої взаємодії. При цьому використовували ГІС-інструментарій АгсGis компанії ESRI. Імпорт та конвертацію атрибутивних і позиційних даних здійснювали в найбільш розповсюджених форматах *.shp, *.dxf, *.xls, *.tab та ін.

Мета даного дослідження — обгрунтувати концептуальну модель застосування ГІС-технологій у діяльності об'єктів природозаповідного фонду (на прикладі Чорнобильського заповідника).

Для вирішення завдань застосування ГІСтехнологій для біологічного моніторингу біологічного різноманіття із застосуванням даних дистанційного зондування поверхні Землі використано матеріали з набору інструментів Орегаtional Land Imager (OLI) ta Thermal Infrared Sensor (TIRS) (таблиця), установлених на супутнику «Landsat-8» (Geological Survey (U.S.). Продукти обробки супутникової інформації, використані в даному дослідженні, розміщено на геопорталі геологічної служби США (United States Geological Survey) [2]. У попередніх своїх дослідженнях ми застосовували саме такий метод обробки даних при визначенні електричної провідності ґрунту в природному заповіднику «Дніпровсько-Орільський», який показав свою значну інформативність [33].

Для моніторингу біологічного та ландшафтного різноманіття заповідника ми використовували індекси, які є похідними від спектральних каналів сенсорів, встановлених на супутниках «Landsat-8» або «Sentinel-2» (ratio of spectral bands) [19]. У цілому, роздільна здатність спектральних каналів «Sentinel-2» вища, ніж у «Landsat-8». Але слід відзначити, що супутник «Sentinel-2» працює на орбіті з 23 червня 2015 р. Тому якщо є необхідність отримати ретроспективну інформацію про екосистеми, є можливість користуватися інформацією з супутника «Landsat-8» чи більш ранніх супутників цієї серії. Для поточного моніторингу перевагу має інформація з супутника «Sentinel-2». Крім того, комбінуючи інформацію з обох джерел, можна отримати дані з кращим часовим розділенням, або є можливість отримати сцени без високого рівня хмарності. Використовувані індекси перелічено нижче.

1. Індекс аерозолів-узбережжя (aerosol/coastal) (AC-Index):

AC = (B1-B2)/(B1+B2) (для обох супутників). 2. Гідротермальний композит (*Hydrothermal Composite*), індекс окислів заліза (*Iron Oxide*) (Hydrothermal_Composite) [16, 29] : HC = B4/B2 (для обох супутників). 3. Глинисті мінерали (*Clay Minerals*) (Clay), а також простий індекс ріллі (*Simple tillage in*-*dex* — STI) [16, 29]:

STI = B6/B7 (для «Landsat-8»),

STI = B11/B12 (для «Sentinel-2»).

Нормалізований диференціальний індекс ріллі (*Normalized Difference Tillage Index* — NDTI) [30], він же Індекс рослинності, враховує варіації біомаси та особливості типів рослинності (*Vegetation Index* — VI) [16] (правильний для обох супутників, STI розраховується за формулою для відповідного супутника):

$$NDTI = \frac{STI - 1}{STI + 1}.$$

4. Нормалізований різницевий індекс рослинності (*Normalized Difference Vegetation Index* — NDVI) [16]:

Основні характеристики спектральних діапазонів сенсорів OLI та TIRS, встановлених	
на супутнику дистанційного зондування Землі «Landsat-8» та сенсора MSI супутника «Sentine	1-2

Спектральний канал	Довжина хвилі, мкм	Роздільна здатність, м	Спектральний канал	Довжина хвилі, мкм	Роздільна здатність, м
«Landsat-8»			«Sentinel-2»		
Operational Land Imager (OLI)			MultiSpectral Instrument (MSI)		
Band 1 (узбережжя та аерозолі,					
coastal /aerosol)	0.430.45	30	B1 (blue)	0.430.45	60
Band 2 (синій, blue)	0.450.52	30	B2 (blue)	0.460.52	10
Band 3 (зелений, green)	0.520.60	30	B3 (green)	0.540.58	10
Band 4 (червоний, red)	0.630.68	30	B4 (red)	0.650.68	10
			B5 (red edge)	0.700.71	20
			B6 (red edge)	0.730.75	20
			B7 (red edge)	0.770.79	20
			B8 (NIR)	0.780.90	10
Band 5 (ближній інфрачервоний,					
NIR)	0.840.87	30	B8a (NIR)	0.860.88	20
			B9 (water vapor)	0.930.95	60
Band 6 (ближній інфрачервоний,					
SWIR1)	1.561.66	30	B11 (SWIR1)	1.571.66	20
Band 7 (ближній інфрачервоний,					• •
SWIR2)	2.102.30	30	B12 (SWRIR2)	2.102.28	20
Band 8 (панхроматичний, PAN)	0.500.68	15			
Band 9 (перисті хмари, cirrus)	1.361.38	30	B10 (cirrus)	1.371.39	60
Thermal Infrared Sensor (TIRS)					
10 (дальній інфрачервоний, TIR1)	10.311.3	100			
11 (дальній інфрачервоний, TIR2)	11.512.5	100			
1	1	1	1	1	1

NDVI = (B5 - B4)/(B5 + B4) (для «Landsat-8»), NDVI = (B8 - B4)/(B8 + B4) (для «Sentinel-2»). 5. Модифікований нормалізований різницевий водний індекс — чутливий до вмісту води в зеленій біомасі (*Modified Normalized Difference Water index* — MNDW) [31]:

> MNDW = (B3 – B6)/(B3 + B6) (для «Landsat-8»), MNDW = (B3 – B11)/(B3 + B11) (для «Sentinel-2»).

6. Індекс вологості поверхні Землі (*Land Sur-face Water Index, Normalized Difference Infrared Index* — LSWI) [13]:

LSWI = (B5–B6)/(B5+B6) (для «Landsat-8»), LSWI = (B8a–B11)/(B8a+B11) (для «Sentinel-2»).

7. Нормалізоване відношення пожеж (*Normalized Burn Ratio* — NBR) [5]:

8. Індекс M15 чутливий до технології обробітку ґрунту та може розглядатися як один з варіантів індексів ріллі [30]:

Залежно від науково-практичних завдань ми можемо досліджувати або часові ряди даних на основі одного з індексів, який нас цікавить. Наприклад, в останній період часу набула особливої важності проблема пожеж. Аналіз часової динаміки нормалізованого індексу пожеж може бути основою для встановлення площ екосистем, які зазнали впливу пірогенного фактора та здійснювати моніторинг динаміки відновлення екосистем після пожеж. Особливе значення має багатовимірний статистичний аналіз комплексу індексів на одну дату. Наприклад, аналіз головних складових сукупності представлених індексів на дату, яка відповідає найбільшій вегетаційній активності рослинного покриву, надасть відомості про різноманіття оселищ та про стан біотичного потенціалу. У кінцевому рахунку тензорний аналіз динаміки сукупності індексів у часі є інструментом дослідження комплексної динаміки еколого-ландшафтних систем.





Процес створення просторових баз даних передбачає низку послідовних процесів, серед яких доцільно підкреслити такі: визначення ГІСінструментів для формування та використання майбутніх просторових баз, послідовності усіх маніпуляцій з даними та власне структури майбутньої бази даних. Функціональність елементів просторових баз даних Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника ґрунтується на взаємодії усіх компонентів баз даних та інструментарію щодо управління ними. Тіло геопорталу Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника спрямоване на використання просторових баз даних у інформаційній мережі, містить категорійну та атрибутивну просторову інформацію, блок обробки даних, а також інтерфейси розробників та користувачів.

Категорійна складова баз даних повинна складатися із опорних цифрових карт, які окреслюють загальну просторову інформацію у вигляді растрових топографічних карт території Заповідника та карт зонування природоохоронної території. Додаткові тематичні шари до загальної ПБД або оцифровуються з допоміжних карт, або сформовані на основі відомостей щодо місцезнаходження та властивостей відповідних об'єктів [12] (рис. 1).

Атрибутивна складова просторових баз даних Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника містить сукупність кількісних і якісних параметрів об'єктів досліджень у вигляді логічно скомпонованих показників, поєднаних з позиційною інформацією. При формуванні ГІС задля вирішення проблем екологічного та природоохоронного характеру застосовується комплексний підхід до територіальної оцінки стану навколишнього середовища та динаміки екологічних процесів. Такий підхід опирається на використання екологічного зонування території заповідника. Ідея цього підходу є у оцінці тенденції змін стану навколишнього середовища заповідника через аналіз змін розмірів екологічних зон. За визначенням екологічна зона — це частина території, на якій індекси стану навколишнього середовища знаходяться у певних однорідних межах.

Важливими елементами, пов'язаними з оцінкою стану довкілля за допомогою екологічних зон, є:

1) створення цифрової моделі, що враховує стан повітря, водних об'єктів, ґрунтового покриву та біотопу;

 розробка комплексного показника стану навколишнього середовища у межах екологічної зони, який може бути розрахований для довільного числа параметрів стану навколишнього середовища. На їхній основі будуть визначатися екологічні зони;

3) створення ГІС для оцінки і аналізу екологічного стану досліджуваних територій.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Усвідомлюючи потребу уніфікації власної інфраструктури просторових даних, Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник ініціював розробку Інфраструктури просторової інформації. Цілі даної ініціативи — зробити геопросторові дані більш доступними для їхнього широкого використання за допомогою вироблення стратегії та тактики їхнього формування, підтримки та візуалізації для широкого загалу стейкхолдерів.

У Чорнобильському радіаційно-екологічному біосферному заповіднику вже накопичилися великі обсяги даних, а їхня сумісність і спільне використання далеко не завжди відповідає потребам сучасності, що фактично знижує цінність накопичених даних, призводить до періодичного дублювання і невпорядкованості ізольованих один від одного масивів просторових даних. Деякі матеріали потребують цифрової обробки, щоб надати можливість їх використовувати. Наразі метою процесу приєднання до системи «opendata» є поєднання усіх наявних просторових даних у єдину узгоджену інфраструктуру, базу інформації та знань.

Для забезпечення ефективного адміністративного менеджменту заповідника є потреба у збиранні та аналізі адміністративної інформації. До цієї складової належать внутрішні розподіли працівників по секторах/ділянках та здійснюється контроль ефективності такого розподілу. За результатами оцінки інтенсивності виникнення подій та явищ на тих чи інших ділянках приймаються рішення до перерозподілу фахівців по території Заповідника. Прикладом таких рішень може бути посилення контролю незаконного перетину межі заповідника там, де це найчастіше відбувається. Аналіз таких подій може визначити сезонність, причини, територіальну належність тощо.

Наукова діяльність – найбільший сегмент ГІС, оскільки це практично пов'язано з метою створення заповідника й умовами його місцезнаходження. Цей сектор має бути найбільш упорядкований та охоплювати збір повного спектру інформації. Збір інформації необов'язково має супроводжуватись актуальністю чи обґрунтованою потребою, оскільки ці чинники можуть виникнути пізніше, а історично відновлювати дані досить складно, тому створення банку даних повинні обмежуватись лише можливостями самого збору. Особливо це актуально для новоствореної заповідної території, де незважаючи на три десятиліття, що проминули з часу аварії на ЧАЕС, ще можна відновити інформацію про доаварійні стани природних та антропогенно трансформованих територій. Оскільки особливістю Заповідника є радіоактивне забруднення, одним із найважливіших аспектів ГІС повинен бути присвячений саме збору інформації про щільність забруднення території радіонуклідами, їхньої питомої активності в біотопі. Це дасть можливість моніторити стан забруднення в часі. Також ця інформація необхідна для організації роботи в зоні радіоактивного забруднення, щоб



Рис. 2. Основні джерела та принципи функціонування геосистеми Чорнобильського радіаційно-екологічного заповідника

не допустити тривалого перебування робітників в зоні з великим рівнем експозиційного випромінювання.

Діяльність Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника пов'язана з вирішенням низки задач екологічного характеру, що зумовлює накопичення різнорідної інформації, яка може мати як кількісні, так і якісні вирази, формування ГІС дозволить оптимальним способом проаналізувати та візуалізувати дані щодо просторово-розподіленої інформації (рис. 2).

Під час формування геоінформаційної системи Чорнобильського радіаційно-екологічного заповідника для забезпечення розв'язання екологічних задач має застосовуватися інтегрований підхід регіональної оцінки якості навколишнього середовища. Основою такого підходу є виділення особливих зон — масивів, які відрізняються один від одного своїм комплексом показників абіогенних, біогенних та антропогенних факторів.

Вони можуть бути представлені у вигляді пробних ділянок чи інших ділянок спостережень та використовуватися для проведення регуляр-

них чи тимчасових спостережень та обліків. Окрім цього, комплексна оцінка окремих масивів дозволить виявити зони особливої небезпеки, а спостереження динаміки цих зон дозволить виявляти позитивні або негативні тенденції у загальній стратегії управління заповідною територією. Виокремлення масивів та зон особливої небезпеки повинні базуватися на оцінці комплексу даних про стан довкілля. В ідеалі якість довкілля повинна бути оцінена за допомогою інтегрованих індексів забруднення чи впливу на довкілля, який має враховувати якомога більше факторів. За інтегрований індекс пропонується розрахунок математичної моделі із врахуванням найбільш важливих природніх особливостей об'єкта, експериментальних масивів даних у своєму початковому стані або з попередньою статистичною обробкою, класифікацією або кластеризацією, відображати певну динаміку у часі і просторі, та дозволяти за допомогою імітації процесів та прогнозування чітко розуміти можливі варіанти розвитку біосистем.

Геоінформаційна система Заповідника повинна передбачати такі **базові принципи**: система повинна будуватися на основі єдиної ГІС- оболонки — найбільш прийнятною наразі є оболонка ArcGis як ключових посередників у імплементації положень Директиви INSPIRE в Україні; для усіх шарів має використовуватися єдина система координат; створення базового шару — первинної ландшафтної карти, на базі якої будуть створюватися, оцінюватися та аналізуватися усі інші дані.

Запропонований нижче перелік картографічних матеріалів має основну цільову функцію зонування території Заповідника із врахуванням низки природно-кліматичних та антропогенних чинників з метою подальшої її оптимізації. Загальна структура просторових баз даних Заповідника має бути орієнтована на певний заданий набір тематичних цифрових карт з їхніми шарами, розподілених за відповідними тематичними блоками.

✓ Геологічна будова — до даного блоку слід віднести створення шарів щодо залягання гірських порід, а саме їхні назви, генезис та вікові параметри, четвертинних відкладів, а саме їхній генезис та потужність. Обов'язковим для даного етапу є створення шару гідротермального композиту, що позначає глинисті відкладення і гірські породи, багаті на глину, а також створює передумови для створення та аналізу інших тематичних шарів, наприклад для визначення вологи в орних землях і рослинності та, відповідно, використовується для вивчення продуктивності біогеоценозів (рис. 3).

✓ Рельєф території — найоптимальнішим варіантом буде створення цифрової моделі рельєфу території заповідника та прилеглих територій, тобто дискретне, комп'ютерне представлення об'єктів рельєфу у вигляді масиву точок з відомими планіметричними координатами і висотами точок земної поверхні. За її допомогою можливою стане апроксимація рельєфу з урахуванням його природних характеристик і умов, а також зв'язків між об'єктами, розташованими на земній поверхні, побудова профілів, визначення вододілів та ліній стоку, вибір оптимальних трас доріг, каналів, меліоративних мереж, інших лінійних об'єктів, виділенням басейнів водозборів, визначення обсягів земляних робіт, отримання даних про зсувні, ерозійні та деформаційні процеси, визначення площ затоплених та підтоплюваних земель, що є сферою гідрологічних досліджень. Програмне забезпечення GIS може використовувати цифрові моделі висот для візуалізації тривимірної поверхні, визначення всіх можливих особливостей місцевості, прогнозування безпечності будь-якого будівництва, генерування контурів та проведення аналізу видимості (у т. ч. радіовидимості) (рис. 4). Окремо слід запланувати створення карти індексів топографічного положення, що дозволить виявляти ухили поверхні, експозицій, форми поверхонь схилів тощо.

✓ Клімат — у даному блоці передбачена побудова картографічного матеріалу та відслідковування даних у динаміці щодо топографічного індексу вологості прямої та розсіяної інсоляції, індексів аерозолів-узбереж (рис. 5), атмосферного тиску, температури повітря, ґрунту, параметрів атмосферних опадів, висоти та запасів води у сніговому покриві, швидкості, повторюваності та напрямів вітрів тощо.

✓ Водні об'єкти — у даному блоці слід висвітлити дані висот над русловою мережею, що фактично, є надійним маркером рівня ґрунтових вод і може бути використано для картографії ґрунтів, а також розподіл водних об'єктів на земній поверхні, а саме різномасштабні індекси гребенів височин і тальвегів, стік, витрати води, показники води тощо.

✓ Грунти — у даному блоці слід створити шари, що показуватимуть типи ґрунтів, їхній фізико-хімічний склад, pH, індекси вологості поверхні Землі, фактори ерозії тощо. Доцільним буде побудова карти індексів балансу геомаси, яка розкриває топографічні передумови до руйнування та відкладення ґрунтів. Індекс балансу геомаси є значущим з точки зору прогнозування небезпечних схилових процесів (зсувів, обвалів, осипів) і оцінки їхнього впливу на об'єкти транспортної та інженерної інфраструктури (автомобільні і залізні дороги, мости тощо) (рис. 6).

✓ Рослинний покрив — за допомогою карт рослинності можна вирішувати низку інших задач, пов'язаних з пожежонебезпечністю, ерозією тощо. Знання про зв'язок структури і стану рослинності з її спектрально-відбивними здібнос-



Рис. 3. Карта гідротермального композиту у межах Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника за даними супутника «Landsat-8» від 24 квітня 2019 р.



Рис. 4. Цифрова модель рельєфу території Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника



Рис. 5. Карта АС-індексу у межах Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника за даними супутника «Landsat-8» від 24 квітня 2019 р.



Рис. 6. Карта індексів балансу геомаси у межах Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника



Рис. 7. Карта зеленого NDVI у межах Чорнобильського біосферного радіаційно-екологічного заповідника за даними супутника «Landsat-8» від 24 квітня 2019 р.

тями дозволяють використовувати супутникові та аерокосмічні знімки для картографування та ідентифікації типів рослинності і її стресового стану. Тому саме цей блок налічуватиме найбільшу кількість картографічного матеріалу. Даний блок відображатиме сучасну рослинність, тобто окремі рослинні асоціації, поширення видів, ярусність, проєктивні покриття, санітарний стан. Доцільним є створення карт нормалізованого відношення пожеж та карту нормалізованого різницевого водного індексу, які дозволяють оцінювати вміст вологи у рослинному покриві та варіювання показників пожежонебезпеки при надмірній втраті вологи у надспекотні періоди. Доцільним є створення карт зеленого NDVI (рис. 7), карт індексу концентрації хлорофілу та ксантофілу, карт індексу рослинності, на основі яких визначають санітарний та екологічний стан рослинного покриву. Слід звернути увагу на створення карт, пов'язаних з лісистістю, а також умовами місцезростання, що формуються у лісах. Тут рекомендовано надати дані щодо трофотопів, гігротопів, породного та вікового складу насаджень тощо. Окрему категорію у даному блоці мають складати масиви даних про поширення видів рослин, що занесені до Червоної книги України та інших охоронюваних списків.

✓ **Тваринний світ** — у даному блоці слід надати дані щодо ареалів поширення диких видів тварин та птахів на території заповідника, а також окремо слід зазначити поширення видів тварин, занесених до Червоної книги України та Європейського Червоного списку.

✓ Землеустрій — у даному блоці слід надати усі дані щодо наявності дорожнього покриття, наявності забудови, меліоративних систем тощо.

✓ **Екологія** — у даному блоці слід надати дані щодо вмісту речовин токсичної та радіаційної дії у компонентах ландшафтів заповідника з чітким окресленням масивів особливо небезпечних ділянок. У цьому аспекті, зважаючи на радіоактивну специфіку ландшафтів, особливу увагу слід відвести пожежонебезпечності регіону.

Визначення небезпечних ділянок на основі супутникових даних та перерахунку їх в особливі індекси (в даному випадку NBR), який буду-



Рис. 8. Карта нормалізованого відношення пожеж (NBR-індексу) у межах Чорнобильського біосферного радіаційноекологічного заповідника за даними супутника «Landsat-8» від 24 квітня 2019 р.



Рис. 9. Космічні знімки Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника: *а* — ландшафтна карта, отримана з супутника «Sentinel-2», *б* — отримане шляхом мультиспектральної обробки співвідношення суходіл-вода

ється на основі низки факторів, що включають запаси вологи, характер рослинного покриву та низку інших показників. Це дозволяє моніторити виникнення ділянок з підвищеною пожежонебезпечністю (рис. 8). ✓ Ландшафти та їхній просторовий розподіл на основі усіх вказаних вище блоків слід визначити просторову структуру типів ландшафтів заповідника. Враховуючи різноманіття ландшафтів, доцільно розмежувати територію заповідника із виділенням зон особливого наукового інтересу та посиленої охорони.

Отже, використання ГІС-технологій при аналізі та удосконаленні функціонування природоохоронних територій є необхідною реалією сучасності з огляду на інформаційно-технологічний прогрес.

ГІС об'єктів природно-заповідного фонду з адекватними просторовими базами даних передбачає поєднання природоохоронної, наукової та освітньої діяльності в єдиний інформаційний простір, що дає можливість швидкого аналізу, прогнозування, порівняння тощо при вирішенні певних оптимізаційних завдань.

Застосування ПБД Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника повинне бути спрямоване на:

• підтримку концепції сталого розвитку регіону,

• упорядкування територіального розвитку природоохоронної території,

• вирішення завдань з ефективного функціонування заповідника,

• проведення подальших моніторингових досліджень,

• збереження генофонду флори та фауни,

• здійснення екологічної просвітницько-виховної роботи,

• аналіз антропогенного впливу на типові природні комплекси регіону тощо.

Вирішення даних питань повинно спиратися на більш детальний і глибокий геоінформаційний аналіз географічних особливостей та закономірностей розвитку і функціонування даного природного комплексу, адже Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник є не тільки центром збереження типових природних комплексів півночі України та важливим елементом місцевої та регіональної екологічної мережі, але й мережі державного та міжнародного значення.

Збір вихідних даних для створення геопорталу може відбуватися різними способами: від польових, стаціонарних чи напівстаціонарних методів до аналізу літератури, архівних даних, іншої науково-технічної інформації. Вагоме місце займають методи ГІС-аналізу та прогнозування, а також дешифрування даних дистанційного зондування Землі. В останньому випадку мова йде про аеро- та космічні знімки, які можуть різнитися масштабом, спектральними каналами, а також методами обробки та аналізу їхньої інтерпретації. Інтеграція таких даних здійснюється шляхом використання геоінформаційних технологій та засобів цифрової картографії. Знімки з високою роздільною здатністю відкривають нові перспективи в аналізі даних, а відслідковування змін у динаміці створює умови для ведення моніторингу території на якісно новому рівні.

Для оптимальної роботи зі знімками ДЗЗ фахівці заповідника повинні оволодіти навичками визначення видів знімків ДЗЗ, використання програмного забезпечення для обробки даних ДЗЗ та основними принципами геоінформаційного картографування, а також оволодіти методами збору та обробки космознімків і географічної інформації.

При формуванні геопорталу заповідника повинні враховуватися такі критерії: знімки повинні бути середньої або високої роздільної здатності, оптимальна смуга знімання — від 10 до 60 км, володіти мультиспектральністю та оновлюватися щорічно, щоквартально або щомісячно для відслідковування динаміки певних показників у часі. Усі ці умови забезпечують знімки, що отримуються з супутників IRS 1C, «Sentinel-2», «Landsat-5», «Landsat-7», TERRA (ASTER), наявні у вільному доступі у інтернеті (рис. 9).

Наступним етапом роботи з даними буде дешифруванння матеріалів ДЗЗ, яке у більшості випадків здійснюється шляхом напівавтоматичного дешифрування, що робить можливим поєднання досвідченості фахівця та оперативності й точності автоматичної обробки знімка. Програмне забезпечення Leica Geosystems ERDAS IMAGINE дозволяє, завдяки розширеному пакету інструментарію, модифікувати, геометрично коригувати і картографувати растрові зображення аеро- та космічних знімків. Однак слід зазначити, що обробка даних невеликих обсягів можлива при використанні машинно-візуальних методів.

На останньому етапі обробки даних слід здійснювати векторизацію матеріалів, після чого

їх вносять у відповідну базу даних у відповідності до створеної на першому етапі класифікації. Тобто, результатом роботи на цьому етапі можуть бути цифрові карти (моделі) рельєфу, карти гідрологічної мережі, сучасного рослинного покриву тощо. Одночасно неуточнений лишаються питання формату подачі цих даних, адже може мати місце неузгодженість меж різногалузевих карт та матеріалів, наданих різними організаціями та структурами, коригування таких даних призводитиме до похибок та нестиковок [8]. Сама ж векторизація необхідних даних також вимагає значних витрат часу [10]. Саме тому на даному етапі достатнім є створення цифрової моделі рельєфу, автоматизована інтерпретація даних яких забезпечує надійний аналіз морфологічної структури [9]. За таких умов дані, що супроводжують цифрову модель рельєфу, тобто фонові матеріали щодо геологічної структури, четвертинних відкладів та рослинного покриву під час підготовки до створення геопорталу можуть використовуватися у вигляді растрів [3].

Створення «тіла геопорталу» передбачає укладання контурів базового ландшафтного шару, ландшафтних виділів та створення легенди. Аналіз науково-технічної інформації показує високу ефективність та інформативність використання генетико-морфологічного підходу у розподілі природніх компонентів та розподілі ландшафтно-територіальної структури. Генетико-морфологічний підхід прийнятний при необхідності інтеграції природно-географічних даних, моделюванні структури ландшафтів тощо. Інтегрована ландшафтна карта, згенерована за допомогою генетико-морфологічного підходу, буде включати базові дані про природні умови ландшафту. Ландшафтне картографування доцільно доповнювати інноваційними підходами з використанням ГІС-технологій [1, 6, 7, 11].

Усе вищезазначене свідчить про неузгодженість прийомів щодо вибору принципів, напрямів та прийомів, які можуть бути використані при організації інфраструктури просторових даних заповідних територій. Немає критеріїв, що визначають детальність та об'єми інформації, які повинні бути ключовими у прийнятті виважених управлінських рішень на усіх рівнях. Більш деталізовані геоінформаційні системи доцільно створювати для локальних територіальних громад, більш узагальнені — для крупніших територіальних одиниць при плануванні та використанні територій районів або областей та вирішенні їхніх стратегічних завдань [5, 15]. Ландшафтні масиви певного рангу слід укладати в одному шарі у вигляді зімкнутих полігонів, а атрибутивні таблиці доцільно укомплектовувати даними про особливості компонентів ландшафтів, ступенів антропогенної трансформованості, інформацією про фізико-хімічні показники грунтів, води тощо.

У структурі геопорталу кожен компонент володіє певним набором атрибутивних даних, які, як і будь-які інші дані, можна аналізувати, оцінювати та створювати на їхній базі прогнози. Прикладом такої оцінки можуть бути карти забруднення території та зв'язок їх із типом або структурою ґрунту, і як наслідок оцінка імовірності їхньої міграції у ландшафті, оцінка токсичності ґрунтів, розкриття топографічних передумов до руйнування та вимивання ґрунтів, що є значущим з точки зору прогнозування небезпечних схилових процесів (зсуви, обвали, осипи) і оцінки їхнього впливу на об'єкти транспортної та інженерної інфраструктури, а також при прогнозуванні ерозійних процесів.

Після завершення усіх попередніх кроків формування геопорталу, слід перейти до підготовки його до використання потенційними стейкхолдерами. Серед основних завдань цього кроку слід окреслити узгодження та компонування тематичних векторних та растрових шарів; вибір способу візуалізації даних так, щоб презентаційний екземпляр був доступним та зрозумілим пересічному громадянину, підготовка до друку карт та пояснювальних записок, легенд до них тощо. Ключовою цільовою аудиторією цього етапу є виключно стейкхолдери порталу, webресурсу чи сторінки заповідника.

Імплементація панєвропейських директив в межах Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника та приєднання до системи «opendate» — нині одне із стратегічних завдань діяльності. Це передбачає кропітку роботу, що включатиме розробку метаданих, підготовку даних, мережевих сервісів, організацію алгоритмів збору інформації, етапи їхнього втілення, обмін даними та сервісами, а також моніторинг даних та підготовку кадрів.

Процес управління навколишнім середовищем є просторовою задачею. Складність її в тому, що її можна розглядати з двох ракурсів, а саме: прив'язка до конкретних координат, а також кількісні та якісні показники критеріїв стану довкілля. Обробка та аналіз даних щодо якості навколишнього середовища дедалі більше знаходять кількісний вираз та спираються на комплексні математичні підходи. Інтерпретація даних щодо якості навколишнього середовища у числові вирази створює умови для більш широкого діапазону маніпуляцій з ними та побудови надскладних просторових моделей та прогнозів щодо розвитку екологічних систем.

Управління навколишнім середовищем — за своєю суттю просторова задача, оскільки вихідну інформацію представлено у двох аспектах, а саме: географічна прив'язка та відповідний фізичний сенс характеристик якості довкілля. Протягом багатьох років проводились дослідження, спрямовані на формування матеріалу, який поєднував просторові і тематичні показники різних територій та накопичення цієї інформації на паперових носіях. Отже, геоінформаційні технології для природоохоронної діяльності — це потужний інструмент для створення і підтримки систем збору інформації, її зберігання, аналізу та ефективного прийняття рішень, спрямованих на оптимізацію управління якістю навколишнього середовища.

висновок

Створення геопорталу заповідника є необхідною передумовою проведення комплексного динамічного моніторингу стану території та біорізноманіття. Геоінформаційні методи покликані спростити взаємоузгодження даних, уникнення повторів та помилок при подачі даних, створювати умови для полегшеного аналізу та швидкої та зрозумілої візуалізації. Також ГІСтехнології сьогодення дозволяють здійснювати низку маніпуляцій з даними, аналізувати, інтерпретувати, створювати прогнози, здійснювати 3D-моделювання тощо.

На даний час нами створено основу геопорталу Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника, подальше наповнення якого передбачає налагоджений процес збору даних за основними запропонованими тематичними блоками: геологічна будова, рельєф, клімат, водні об'єкти, ґрунти, рослинний покрив, тваринний світ, землеустрій, екологія, ландшафти та зонування.

Створення геопорталу дозволить Чорнобильському радіаційно-екологічному біосферному заповіднику долучитися до ініціатив «opendata», передбачених Директивою про INSPIRE Європейського Союзу, що полягає у забезпеченні усіх стейкхолдерів даними щодо природніх умов та антропогенної трансформації ландшафтів на сучасному етапі та у динаміці, візуалізація цієї інформації у формі, зручній для аналізу, оцінки та прогнозування науково-технічним персоналом заповідника та користувачами поза його межами.

Сам же геопортал є центральною платформою природно-географічної та пов'язаної із нею інформації, яка буде ключовим рушієм та підставою для обґрунтування управлінських рішень у сфері оцінки впливів на довкілля, при виділенні функціональних зон, зон особливого контролю, окреслення масивів особливого наукового, охоронного чи іншого інтересу, планування об'єктів моніторингу, пробних ділянок, коридорів міграції об'єктів тваринного світу тощо.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Безверхнюк Т. Н. Методика постоения ландшафтных карт с использованием ГИС технологии. *Уч. зап. ТНУ*. 1999. **12**(51), № 1. С. 47—49.
- Геопортал Геологічної служби США (United States Geological Survey). URL: http://earthexplorer.usgs.gov (дата звернення: 26.03.2020).
- Голубцов О. Г., Путренко В. В., Чехній В. М., Фаріон Ю. М. Ландшафтна ГІС як результат ландшафтознавчого прикладного дослідження адміністративного району: методичні аспекти. Географія та туризм. 2010. 10. С. 141—153.
- 4. Горбань І. М., Кошовий В. В., Альохіна О. В., Курсіш І. Й. Застосування ГІС та методів дистанційного зондування Землі для оцінки стану біорізноманіття водно-болотних угідь міжнародного значення. Екологія водно-болотних угідь і торфовищ: зб. наук. статей. Київ: ДІА, 2013. С. 48.
- 5. Гродзинський М. Д. Основи ландшафтної екології: Підручник. Київ: Либідь, 1993. 224 с
- 6. Давидчук В. С., Сорокіна Л. Ю., Родіна В. В. Геоінформаційні технології у ландшафтному картографуванні. Фіз. географія та геоморфологія. 2005. Вип. 47. С. 24—30.
- 7. Загородня С. А. Геоінформаційні технології для екологічної оцінки природно-заповідних територій. *Екологічна безпека та природокористування*. 2016. № 3-4. С. 87—93.
- Круглов I. Геоінформаційний аспект організації державного земельного кадастру України. Budownictwo i Inzyneria Srodowiska (Rzeszów, Poland). 1998. 29. С. 85—93.
- Мкртчян А. С. Автоматизированное выделение ландшафтных единиц путем классификации рельефа с применением ГИС. Ландшафтное планирование: общие основания, методология, технология. 2006. 18. С. 203—208.
- Мкртчян О. С. Ландшафтно-екологічні основи інтеграції даних в земельні інформаційні системи: дис. ... канд. геогр. наук. Львів, 2006. 215 с.
- 11. Пересадько В. А., Сінна О. І., Вяткін К. В., Бодня О. В. Геоінформаційне забезпечення природоохоонних територій. *Пробл. безперервної географічної освіти і картографії*. 2012. **15**. С. 74—77.
- Пласкальний В. В. Створення та використання елементів просторових баз даних Чорноморський біосферний заповідник. Географія та туризм. 2012. 18. С. 316—322.
- Chandrasekar K., Sesha Sai M. V. R., Roy P. S., Dwevedi R. S. Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. *Int. J. Remote Sens.* 2010. **31**(15). P. 3987–4005. doi.org/10.1080/ 01431160802575653.
- Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Millán V. E. G., Michael F. Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status–New opportunities and challenges. *Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinformation*. 2015. 37. P. 7–16.
- 15. Finke L. Landschaftsökologie. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag GmbH, 1993. 232 p.
- 16. Jensen J. R. Introductory Digital Image Processing. Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice-Hall, 1986.
- 17. Keeley J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *Int. J. Wildland Fire.* 2009. **18**(1). P. 116–126.
- Kunah O. M., Pakhomov O. Y., Zymaroieva A. A., Demchuk N. I., Skupskyi R. M., Bezuhla L. S., Vladyka Y. P. Agroeconomic and agroecological aspects of spatial variation of rye (Secale cereale) yields within Polesia and the Forest-Steppe zone of Ukraine: The usage of geographically weighted principal components analysis. *Biosystems Diversity*. 2018. 26(4). P. 276–285. doi:10.15421/011842.
- Kunah O. M., Papka O. S. Ecogeographical determinants of the ecological niche of the common milkweed (Asclepias syriaca) on the basis of indices of remote sensing of land images. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology.* 2016. 24(1). P. 78–86. doi: https://doi.org/10.15421/011609
- Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Basarab R., Yaylimov B., Lavreniuk M. S., Kolotii A., Yashchuk D. Retrospective regional level land cover map for Ukraine: methodology of development and results analysis. *Space Science and Technology*. 2015. 21(3). P. 31–39.
- Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Artemenko I. G., Popadjuk L. M., Fedyna R. M., Voloshanenko A. S. Anuncertainty analysis in the climatic change estimation problem on regional level with the use of satellite observations of atmospheric concentration of greenhouse gases. *Space Science and Technology*. 2013. **19**(6). P. 18–26.
- Movchan D. M.. Estimation of Ukrainian forest cover (Western Polissia) using remote sensing data. Space Science and Technology. 2013. 19(4). P. 29–43.
- Oláhová J., Vojtek M., Boltižiar M. Application of geoinformation technologies for the assessment of landscape structure using landscape-ecological indexes (case study of the Handlová landslide). *Tájökológiai Lapok*. 2013. 11(2). P. 351–366.
- O'Neill R. V., Riitters K. H., Wickham J. D., Jones K. B. Landscape pattern metrics and regional assessment. *Ecosystem health*. 1999. 5(4). P. 225–233.

- Rodríguez I., Montoya I., Sánchez M. J., Carreño F. Geographic information systems applied to integrated coastal zone management. *Geomorphology*. 2009. 107(1-2). P. 100–105.
- 26. Romanchuck L. D., Fedonyuk T. P., Fedonyuk R. G. Model of influence of landscape vegetation on mass transfer processes. *Biosystems Diversity*. 2017. **25**(3). P. 203–209. doi:10.15421/011731.
- Romanchuk L. D., Fedonuk T. P., Khant G. O. Radiomonitoring of plant products and soils of Polissia during the long-term period after the disaster at the Chornobyl Nuclear Power Plant. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2017. 8(3). P. 444–454. doi.org/10.15421/021769.
- 28. Tomchenko O. V. Using remote sensing imagery and ground-based observations for integrated assessment of the Kyiv reservoir's ecosystem services on the basis of analytic hierarchy process. *Space Science and Technology*. 2014. **20**(5). P. 41–49.
- Tucker C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sens. Environ.* 1979. 8(2). P. 127–150. doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Van Deventer A. P., Ward A. D., Gowda P. H., Lyon J. G. Using Thematic Mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. *Photogramm. Eng. and Remote Sens.* 1997. 63. P. 87–93.
- Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhanceopen water features in remotely sensed imagery. Int. J. Remote Sens. 2006. 27(14). P. 3025–3033.
- 32. Zhukov A. V., Sirovatko V. O., Ponomarenko N. O. Spatial dynamic of the agriculture fields towards their shape and size. *Ukr. J. Ecology*. 2017. **7**(3). P. 14–31. doi: 10.15421/2017_45.
- Zhukov O. V., Kunah O. M., Taran V. O., Lebedinska M. M. Spatial variability of soils electrical conductivity within arena of the river Dnepr valley (territory of the natural reserve «Dniprovsko-orilsky»). *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University*. 2016. 6 (2). P. 129–157.
- Zhukov O. V., Pelina T. O., Demchuk O. M., Demchuk N. I., Koberniuk S. O. Agroecological and agroeconomic aspects of the grain and grain legumes (pulses) yield dynamic within the Dnipropetrovsk region (period 1966–2016). *Biosystems Diversity*. 2018. 26(2). P. 170–176. doi:10.15421/011826
- Zhukov O. V., Ponomarenko S. V. Spatial-temporal dynamics of sunflower yield the ecological and agricultural approach. Ukr. J. Ecology. 2017. 7(3). P. 186–207. doi: 10.15421/2017_68
- Zhukov A. V., Sirovatko V. O., Ponomarenko N. O. Spatial dynamic of the agriculture fields towards their shape and size. Ukr. J. Ecology. 2017. 7(3). P. 14–31. doi: 10.15421/2017_45

Стаття надійшла до редакції 02.04.2020

REFERENCES

- 1. Bezverkhnyuk T. N. (1999). A technique for constructing landscape maps using GIS technology. *Scientific notes of TNU*, **12**(51), No. 1, 47–49 [in Russian].
- 2. United States Geological Survey. URL: http://earthexplorer.usgs.gov (Last accessed 26.03.2020).
- 3. Golubtsov O. G., Putrenko V. V., Chekhniy V. M., Farion Yu. M. (2010). Landscape GIS as the result of landscape-based applied awareness of the administrative region: methodical aspects. *Geography and tourism*, **10**, 141–153 [in Ukrainian].
- 4. Gorban I. M., Koshovy V. V, Alyokhina O. V, Kursish I. Y. (2013). Application of GIS and methods of remote sensing of the Earth to assess the state of biodiversity of wetlands of international importance. *Ecology of wetlands and peatlands*: Coll. Science. articles. Kyiv: DIA, 48 [in Ukrainian].
- 5. Grodzinsky M. D. (1993). Fundamentals of landscape ecology: Textbook. K.: Lybid, 224 p. [in Ukrainian].
- 6. Davidchuk V. S., Sorokina L. Yu., Rodina V. V. (2005). Geoinformation technologies in landscape mapping. *Physical geography and geomorphology*, № 47, 24–30 [in Ukrainian].
- Zagorodnya S. A. (2016). Geoinformation technologies for ecological assessment of nature reserves. *Ecological safety and nature management.* 3-4, 87–93 [in Ukrainian]
- 8. Kruglov I. (1998). Geoinformation aspect of the organization of the state land cadastre of Ukraine. *Budownictwo i Inzyneria Srodowiska (Rzeszów, Poland)*. **29**, 85–93 [in Ukrainian].
- Mkrtchyan A. S. (2006). Automated allocation of landscape units by relief classification using GIS. Landscape planning: general bases, methodology, technology. 18, 203–208 [in Russian].
- 10. Mkrtchyan O. S. (2006). *Landscape-ecological bases of data integration into land information systems*: Thesis for cand. geogr. sciences. Lviv National University named after Ivan Franko [in Ukrainian].
- 11. Peresadko V. A., Sinna O. I., Vyatkin K. V., Bodnya O. V. (2012). Geoinformation support of protected areas. *Problems of continuing geographical education and cartography*. **15**, 74–77 [in Ukrainian].
- 12. Plaskalny V. V. (2012). Creation and use of elements of spatial databases Black Sea Biosphere Reserve. *Geography and tourism.* **18**, 316–322 [in Ukrainian].

- Chandrasekar K., Sesha Sai M. V. R., Roy P. S., Dwevedi R. S. (2010). Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS vegetation index product. *Int. J. Remote Sensing*, 31(15), 3987–4005. https://doi. org/10.1080/01431160802575653.
- Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., Millán V. E. G., Michael F. (2015). Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status—New opportunities and challenges. *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 37, 7–16.
- 15. Finke L. (1993). Landscape ecology. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag GmbH.
- 16. Jensen J. R. (1986). Introductory Digital Image Processing. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- 17. Keeley J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage. *Int. J. Wildland Fire*, **18**(1), 116–126.
- Kunah O. M., Pakhomov O. Y., Zymaroieva A. A., Demchuk N. I., Skupskyi R. M., Bezuhla L. S., Vladyka Y. P. (2018). Agroeconomic and agroecological aspects of spatial variation of rye (Secale cereale) yields within Polesia and the Forest-Steppe zone of Ukraine: The usage of geographically weighted principal components analysis. *Biosystems Diversity*, 26(4), 276–285. doi:10.15421/011842.
- Kunah O. M., Papka O. S. (2016). Ecogeographical determinants of the ecological niche of the common milkweed (Asclepias syriaca) on the basis of indices of remote sensing of land images. *Visnyk of Dnipropetrovsk Univ. Biology, ecology,* 24(1), 78–86. doi: https://doi.org/10.15421/011609.
- Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Basarab R., Yaylimov B., Lavreniuk M. S., Kolotii A., Yashchuk D. (2015). Retrospective regional level land cover map for Ukraine: methodology of development and results analysis. *Space Science and Technol*ogy, 21(3), 31–39.
- 21. Lyalko V. I., Kostyuchenko Yu. V., Artemenko I. G., Popadjuk L. M., Fedyna R. M., Voloshanenko A. S. (2013). Anuncertainty analysis in the climatic change estimation problem on regional level with the use of satellite observations of atmospheric concentration of greenhouse gases. *Space Science and Technology*, 19(6), 18–26.
- Movchan D. M. (2013). Estimation of Ukrainian forest cover (Western Polissia) using remote sensing data. Space Science and Technology, 19(4), 29–43.
- Oláhová J., Vojtek M., Boltižiar M. (2013). Application of geoinformation technologies for the assessment of landscape structure using landscape-ecological indexes (case study of the Handlová landslide). Tájökológiai Lapok, 11(2), 351–366.
- O'Neill R. V., Riitters K. H., Wickham J. D., Jones K. B. (1999). Landscape pattern metrics and regional assessment. *Ecosystem health*, 5(4), 225–233.
- Rodríguez I., Montoya I., Sánchez M. J., Carreño F. (2009). Geographic information systems applied to integrated coastal zone management. *Geomorphology*, 107(1-2), 100–105.
- 26. Romanchuck L. D., Fedonyuk T. P., Fedonyuk R. G. (2017). Model of influence of landscape vegetation on mass transfer processes. *Biosystems Diversity*, **25**(3), 203–209. doi:10.15421/011731.
- Romanchuk L. D., Fedonuk T. P., Khant G. O. (2017). Radiomonitoring of plant products and soils of Polissia during the long-term period after the disaster at the Chornobyl Nuclear Power Plant. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 8(3), 444–454. doi.org/10.15421/021769.
- 28. Tomchenko O. V. (2014). Using remote sensing imagery and ground-based observations for integrated assessment of the Kyiv reservoir's ecosystem services on the basis of analytic hierarchy process. *Space Science and Technology*, **20**(5), 41–49.
- 29. Tucker C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sens. Environ.*, **8**(2), 127–150. doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- Van Deventer A. P., Ward A. D., Gowda P. H., Lyon J. G. (1997). Using Thematic Mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices. *Photogramm. Eng. and Remote Sens.*, 63, 87–93.
- 31. Xu H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhanceopen water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.*, **27**(14), 3025–3033.
- 32. Zhukov A. V., Sirovatko V. O., Ponomarenko N. O. (2017). Spatial dynamic of the agriculture fields towards their shape and size. *Ukr. J. Ecology*. 7(3), 14–31. doi: 10.15421/2017_45.
- Zhukov O. V., Kunah O. M., Taran V. O., Lebedinska M. M. (2016). Spatial variability of soils electrical conductivity within arena of the river Dnepr valley (territory of the natural reserve «Dniprovsko-orilsky»). *Biological Bulletin of Bogdan Chmel*nitskiy Melitopol State Pedagogical University, 6 (2), 129–157.
- Zhukov O. V., Pelina T. O., Demchuk O. M., Demchuk N. I., Koberniuk S. O. (2018). Agroecological and agroeconomic aspects of the grain and grain legumes (pulses) yield dynamic within the Dnipropetrovsk region (period 1966—2016). *Biosystems Diversity*, 26(2), 170–176. doi:10.15421/011826
- 35. Zhukov O. V., Ponomarenko S. V. (2017). Spatial-temporal dynamics of sunflower yield the ecological and agricultural approach. *Ukr. J. Ecology*, 7(3), 186–207. doi: 10.15421/2017_68.

36. Zymaroieva A., Zhukov O., Fedonyuk T., Pinkina T. (2020). The spatio-temporal trend of rapeseed yields in Ukraine as a marker of agro-economic factors influence. *Agronomy Res.*, 18(S2), 1584—1596. doi: 10.15159/AR.20.119.

Received 02.04.2020

T. P. Fedonyuk¹, Dr. Sci. in Agricult. Sci., Professor, Head of Education and Research Center

for Ecology and Environmental Protection of the Polissya National University

E-mail: tanyavasiluk2015@gmail.com

O. M. Galushchenko², Director of Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve

*T. V. Melnichuk*², Deputy Director for Science and International Cooperation of Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve

O. V. Zhukov³, Dr. Sci. in Biol., Professor in Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University

D. O. Vishnevskiy², Head of Scientific Department of Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve

A. A. Zymaroieva¹, Ph.D. in Biol., Associate Professor in the Department of Forestry of Polissya National University

V. V. Hurelia¹, Ph.D. in Agricult. Sci., Head of the Department of Geodesy and Land Management

of Polissya National University

- ¹ Polissya National University
- 7 Staryi Blvd., Zhytomyr, 10008 Ukraine
- ² Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve 28 Tolochyna Str., village Ivankiv, Kyiv Region, 07201 Ukraine
- 25 Preobrazhenska Str., Kyiv, 03110 Ukraine
- ³ Bogdan Khmelnitsky Melitopol State Pedagogical University 20 Hetmanska Str., Melitopol, 72300 Ukraine

PROSPECTS AND MAIN ASPECTS OF THE GIS-TECHNOLOGIES APPLICATION FOR MONITORING OF BIODIVERSITY (ON THE EXAMPLE OF THE CHORNOBYL RADIATION-ECOLOGICAL BIOSPHERE RESERVE)

We developed the conceptual model of the use of GIS technologies in the activity of natural reserve fund objects on the example of the Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve. The GIS technologies is highly demanded due to the large area of the object, the complexity of the technogenic environment (radiation pollution), and the lack of a single database for the years preceding the creation of the Reserve. Therefore, the creation of the Reserve's geoportal is an important prerequisite for integrated dynamic monitoring of the environment and biodiversity.

The functional diagram of the formation and usage of the Reserve spatial database components consists of three units. They are the unit of data filling (attribute information), the received information processing unit (filling layers), and the unit of information usage (cartographic material). At present, we have created the basis for the Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve geoportal. The further filling of the geoportal is provided by the established process of data collection in frameworks of the main proposed thematic blocks: geological structure, topography, climate, water bodies, soils, flora, fauna, ecology, and landscapes' diversity. The geoportal is the central platform of natural geographic and related information, which will be the key driver and the basis for management decisions in the field of environmental impact assessment, in the allocation of functional zones, zones of special control, delineation of areas of special scientific, security or other interest, planning of monitoring objects, test sites, wildlife migration corridors, etc.

Keywords: geoportal, GIS technologies, Chornobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve, strategy, concept, natural reserve, biodiversity.

Соціогуманітарні аспекти космічних досліджень

Social Sciences in Space Exploration

https://doi.org/10.15407/knit2020.06.094

I. B. VAVILOVA¹, Dr. Sci. in Phys. & Math., Head Dep., Docent
E-mail: irivav@mao.kiev.ua
V. S. ZIEVAKO², Cand. Sci. in Tech., Docent, Head of Study Department, RS SRC
E-mail: zws@ukr.net
L. K. PAKULIAK¹, Cand. Sci. in Phys. & Math., Senior Researcher
E-mail: pakuliak@mao.kiev.ua
L. P. POTAPOVYCH², Academic Secretary – Head of Science Organization Department, RS SRC, Cand. Sci. in Tech.
E-mail: info@yuzhnoye.com
¹ Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine
27 Akademik Zabolotny St., Kyiv, Ukraine 03143
² Yuzhnoye State Design Office
3 Kryvorizka St., Dnipro, Ukraine 49008

"SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY" JOURNAL: STATISTICS AND SCIENTOMETRICS FOR 1995-2020 YEARS

The paper deals with statistical and scientometric analysis of articles published in the scientific-practical journal "Space Science and Technology" of the NAS of Ukraine for the period of 1995–2020 (127 issues and 19 supplements). Statistical analysis includes the data on the number of articles by year of publication and by headings, by the geographical distribution of institutions where the authors work, etc. A preliminary analysis of the relationship between the number of articles on various topics of the journal and the development of relevant areas of space research in Ukraine is presented.

Keywords: space research, journal, scientometrics.

1. INTRODUCTION

The "Space Science and Technology" is the journal of scientific and applied space research of the National Academy of Sciences of Ukraine (NAS of Ukraine). The Journal publishes original and review scientific papers in all the multidisciplinary research fields of space activity. The Journal was established in 1995 by the Resolution № 307 of the Presidium of the NAS of Ukraine on December 28, 1994. The State Space Agency of Ukraine was the co-founder of the Journal till the end of 2018. The Journal is intended for professionals in space science and technology as well as for those who use space technologies for various applications. It is useful also for the readers who want to get acquainted with achievements of the space-rocket industry and space science of Ukraine. The Journal became a worthy successor of the previous specialized journals, which were established by the NAS of Ukraine, such as the "Space Research in Ukraine" (1973–1984) and the "Space Science and Technique" (1986–1992).The idea of creating a new "Space Science and Technology" journal, on the

Цитування: Vavilova I. B., Zievako V. S., Pakuliak L. K., Potapovych L. P. "Space Science and Technology" journal: Statistics and Scientometrics for 1995—2020 years. *Space Science and Technology*. 2020. **26**, № 6 (127). C. 94—103. https://doi. org/10.15407/knit2020.06.094

pages of which the various aspects of space industry activity would be discussed, was proposed by Prof. Yaroslav S. Yatskiv (Director of the Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine) and supported by Prof. Borys E. Paton (President of the NAS of Ukraine in 1962—2020, Editor-in-Chief of the Journal in 1995—2020).

The main stages of development of the Journal during the period of 1995-2015 were presented in papers by Kislyuk V. S., Klymenko O. V., and Klymenko V. M. [1-4].

In 2015—2020 the digitization of all the publications was provided under the support of the Yangel Yuzhnoye State Design Office (Dnipro, Ukraine) and its General Director, Prof. Olexander V. Degtyarev, as well as the Ukrainian Branch of the International Academy of Astronautics. The archive and current papers are fully available through the website of the Journal [5].

Thematically, the Journal is organized as follows: space-rocket complexes, spacecraft design and manufacture, scientific payload of spacecraft, control systems, dynamics, and energetics of space vehicles and spacecraft; study of the Earth from space; space physics and astronomy, space biology and medicine, space material science, space communications and satellite navigation, monitoring of space debris, social sciences in space exploration (management, legal, education, philosophical aspects), and history of space research.

In the course of twenty-six years of activity, the "Space Science and Technology" journal has gained wide recognition in Ukraine and abroad as well as has significantly provided space research in Ukraine. Thanks to the efforts of the Editorial Board and Editorial Office, the 26 volumes (namely 127 issues and 19 supplements) had been published by the end of December 2020 (Table 1). These issues contain 2002 articles (30 % of them were prepared with the participation of foreign authors). These articles were prepared by 2673 authors and are of a different type: 1868 scientific papers with DOI and 134 articles likely brief reports of results presented at the conferences, forewords to the issues, memorial publications, etc.

The topics of Supplements in 1995–2007 are described below ([5], http://space-scitechjournal.org. ua/en/archive):

* (History of Space Research) Borodenkov A. M., Volkov M. V., Dormidontov A. G., Stegniy A. I. (1995); Yuri Kondratyuk – the space trajectory predictor [6]; Zavalishin, A. P. (1995) Who are you, Yuri Kondratyuk? [7];

* (Space Geoinformatics and Geodesy) Bolotin, S., Gaiovitch, I., Khoda, O.A., Samoilenko, A., Yatskiv, Ya.S. (1995). GPS Observational Campaign in the Geodynamics Test Area "Simeiz-Katsiveli": Data Processing and Results [8];

* (Space Geoinformatics and Geodesy) Demchyk, M. I., Kirichenko, A. G., Kizyun, L. M., Klimik, V.U., Kudak, K.A., Matso, G. M., Starodubtseva, O. E. (1996). The observations and identification of space geosynchronous objects [9];

* (Space-Rocket Complexes, History of Space research) Andreev, V. L., Konyukhov, S. N. (1996). M. K. Yangel — chief designer of space-rocket systems [10];

* (History of Space Research) Zavalishin, A. P., Datsenko, A. V. (1997). Yu. V. Kondratyuk (O. G. Shargei) – the founder of cosmonautics [11];

* (Study of the Earth from Space) Lyalko, V.I., Fedorovskyi, O.D. (1997). Ukraine from space. Atlas of decoded images of the area of Ukraine from space platforms [12];

* (Space Instruments) Kucherov, V. A., Ivanov, Yu.S., Efimov, Yu. S., Berdyugin, A. V., Shakhovskoy, N. M. (1997). Ultraviolet Low-Resolution Spectropolarimeter for the Space Mission Spectrum-UV (UVSPEPOL Project) [13];

* (Space Geoinformatics and Geodesy) Kizyun, L. M., Kirichenko, A. G., Rudenko, S. P., Demchyk, M. I., Klimik, V. U., Kudak, K. A., Matso, G. M., Starodubtseva, O. E. (1998). Catalogue GOCKU96 of positions and orbital elements of geosynchronous space objects observed in 1996 [14];

 Table 1. The summarized general statistics of issues

 of the "Space Science and Technology" journal

Total	Issues	Publications	Authors
Numbers + Supplements	127 + 19	2002 (1868 papers with DOI)	2673

* Proceedings of the II International Young Scientific Conference "Human & Space" held in 2000, Dnipro, Ukraine (2001);

* Proceedings of the VIII Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion held in 2000, Alushta, Crimea, Ukraine (2001);

* Proceedings of the III International Young Scientific Conference "Human & Space" held in 2001, Dnipro, Ukraine (2002);

* Proceedings of the II Ukrainian Conference for Perspective Space Research held in 2002, Katsiveli, Crimea, Ukraine (2002);

* Proceedings of the IV International Young Scientific Conference "Human & Space" held in 2002, Dnipro, Ukraine (2003);

* Proceedings of the III Ukrainian Conference for Perspective Space Research held in 2003, Katsiveli, Crimea, Ukraine (2003);

* Proceedings of the V International Young Scientific Conference "Human & Space" held in 2003, Dnipro, Ukraine (2004);

* (Astronomy and Astrophysics) Shkuratov, Yu. G., Kislyuk, V. S., Lytvynenko, L. M., Yatskiv, Ya. S. (2004). Model of the Moon 2004 for the «UkrSelene» project [15];

* Proceedings of the V International Young Scientific Conference "Human & Space" held in 2004, Dnipro, Ukraine (2005);

* Author Index of the "Space Science and Technology" journal in 1995—2005 to the Volumes 1–11. (Eds.) Kislyuk V. S., Klymenko V. M., Klymenko O. V. (2005);

* Proceedings of the I Scientific Conference "Science on the Earth and Space — to the Humanity" held in 2007, Kyiv, Ukraine (2007).

During 2000–2020, the specialized issues and reviews were published, which covered such topics as the Ukrainian scientific research and technological experiments proposed for the International Space Station ([16], 2000, Is. 4), important cornerstones in the cosmic era ([17], 2001, Is. 1), space navigation and communications (2001, Is. 4, see, for example, [18]), study of the Earth from space (2002, Is. 2–3, see, for example, [19]), space oceanology and space system "Ocean–Sich" (2007, Is. 5, see, for example, [20]), reports on "The Target Program of the NAS

of Ukraine of the Space Scientific Research" (see, for example, [21]), spatio-temporal dynamics of traveling ionospheric peturbations [22], to the 100th anniversary of the birthday of Prof. Borys E. Paton, President of the NAS of Ukraine, Editor-in-Chief of the "Space Science and Technology" journal (2018, Is. 5) as well as the results of space research presented during the International conferences "Space Technologies: Present and Future", Dnipro, Ukraine (see, for example, [23—25]), and other topics.

2. STATISTICAL RESULTS AND SCIENTOMETRICS

"Scientometrics is concerned with the quantitative features and characteristics of science and scientific research. Emphasis is placed on investigations in which the development and mechanism of science are studied by statistical mathematical methods" as well as reflects communication in science and science policy [26]. To illustrate this, the statistics of 2002 publications related to their distribution by years and journal headings, languages, and geography of institutions, where the authors work, is shown in Figures 1–4.

Figure 1 demonstrates that, on average, the publication rate is about 50 articles per year (not considering the proceedings of conferences in 2000–2004 and special issue [16] in 2000).

As for the language of articles (Fig. 2), one can see that 9 % are in English, 29 % in Ukrainian, and 62 % in Russian (185, 580, and 1237 articles, respectively). Figure 3 gives information on the publication activity of the Ukrainian and foreign authors as concerns with their affiliation. The most active Ukrainian authors work in Kyiv, Dnipro, Kharkiv, Odesa, and L'viv, where the largest organizations of the rocketspace industry and institutes/universities engaged in scientific space research are concentrated. The rest part of the Ukrainian authors is grouped as "Others". The foreign authors represent a quarter of the total, both in terms of the number of authors and the number of articles (Fig. 3, top; left down).

If we consider publication activity among universities of the Ministry for Education and Sciences (MES) of Ukraine, institutions of the NAS of Ukraine, and Yangel Yuzhnoye SDO, we see that it is higher for institutions of the NAS of Ukraine (Fig. 3, right down; N.B.: if the article contains authors from



"Space Science and Technology" journal: Statistics and Scientometrics for 1995-2020 years

Figure 1. Distribution of 2002 publications in the "Space Science and Technology" journal by years



Figure 2. Distribution of 2002 publications in the "Space Science and Technology" journal by the language of publications

the academic institutions and from universities, then the article is counted in both groups). As for universities, the authors from the NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", national universities of Kharkiv and Kyiv most often present results of their research in the Journal. The representation of foreign authors by their country affiliation is as follows: Australia, Austria, Belarus, Belgium, Bulgaria, Czech Republic, China, Denmark, Finland, France, Georgia, Germany, Hungary, India, Italy, Latvia, Mexico, the Netherlands, New Zealand, Poland, Romania, Russia (mostly), Slovakia, South Africa, Spain, Switzerland, United Kingdom, USA, and Uzbekistan. These statistics are given in Fig. 5 (distribution of foreign authors by countries) and Fig. 6 (distribution of articles with the participation of foreign authors).

The list of institutions, where the authors of publications work, is presented in the extended version of this paper on the journal's web-site. We note the most active authors: Chernogor L. F. (64 articles, V.N. Karazin National University of Kharkiv), Cheremnykh O. K. (57, Space Research Institute of the NAS of Ukraine and SSA of Ukraine, Kyiv), Lyalko V. I. (52, Centre for Aerospace Research of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv), Fedorovsky O. D. (40, Centre for Aerospace Research of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv), Ma-



Figure 3. Publication activity of the Ukrainian and foreign authors

karov A. L. (25, Yangel Yuzhnoye SDO, Dnipro), Karachun V. V. (25, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine).

It's useful to analyze the statistical distribution of articles by journal headings (Figure 4) with their relevance to the development of various fields of space science and technology in Ukraine. Let us briefly consider several of these headings, where the authors have own experience.

"Space-Rocket Complexes — Spacecraft and Payloads": this research field is presented in ~200 scientific papers, mostly by the authors from the Yangel Yuzhnoe SDO and other organizations of the State Space Agency of Ukraine as well as the Institute of Technical Mechanics of the NAS of Ukraine (Dnipro), National Aerospace University (Kharkiv). Among the topics of research, for example, are as follows: "Zenit-3SL" [27], "Cyclone-4M" [28], and airborne-space launch vehicles [29], universal transport power jet propulsion of platforms [30] and gyrostabilized platforms, methods for calculating the strength of rocket-space shell structures, multicriterial comparative analysis of rocket and space technology, methodological aspects of design and development of space launch systems under international cooperation [31], and creation of return orbiter in the form of a remote sensing satellite and launch vehicle [32].

"Astronomy & Astrophysics" topics: more than 130 papers, which deal with research on the Moon exploration [33 - 35], activity of the central part of



Figure 4. Distribution of 2002 publications by Journal's headings: (1) – Astronomy and Astrophysics; (2) – History of Space Research; (3) –Social Sciences in Space Exploration; (4) –Space and Atmospheric Physics; (5) –Space Energy, Power and Propulsion; (6) – Space Environment Monitoring and Space Debris; (7) –Space Geoinformatics and Geodesy; (8) –Space Instruments; (9) – Space Life Sciences; (10) – Space Materials and Technologies; (11) –Space Navigation and Communications; (12) –Space-Rocket Complexes; (13) – Spacecraft Dynamics and Control; (14) – Spacecraft and Payloads; (15) – Study of the Earth from Space

galaxies and quasars [36, 37], the study of the evolution of coronal holes based on ground/space observations, results of the DIFOS-F space experiment on the five-minute Solar brightness oscillations [38, 39] and dynamic models of the photospheric and chromospheric layers of solar flares [40], processes of coronal mass ejection [41] and cosmic gamma-rays [42, 43], space missions in the inner region of the Solar system [44], general relativity tests [45, 46], and principles for development of the Ukrainian virtual observatory [47], radio mm-wave interferometry [48] and decameter wave radioastronomy [49, 50].

Since 2016 the journal has been included in the "Program for Support of Scientific Journals of the National Academy of Sciences of Ukraine", thanks to which the DOI are provided and the bibliography is registered through the international CrossRef database for articles in current issues. The journal is issued by the Publishing House "Akademperyodyka" of the NAS of Ukraine (editing of papers, layout, and printing).



Fig. 5. Distribution of foreign authors by countries



Fig. 6. Distribution of articles with participation of foreign authors

In 2020, according to the orders of the Ministry of Education and Science of Ukraine on 17.03.2020 No. 409, on 02.07.2020 No. 886, on 24.09.2020 No. 1188, on 26.11.2020 No. 1471 concerning "The list of scientific professional journals of Ukraine in which results of dissertations for obtaining scientific degrees of the Doctor of Sciences, Candidate of Sciences, and Philosophy Doctor, Journal "Space Science and Technology" is included in the category "A". Specialty codes for dissertation defense are as follows: 09 Biology: 091 Biology; 10 Natural Sciences: 103 Earth Sciences, 104 Physics and Astronomy, 105 Applied Physics and Nanomaterials; 11 Mathematics and Statistics: 113 Applied Mathematics; 12 Information Technology: 121 Software Engineering; 122 Computer Science and Information Technology; 124 Systems Analysis; 13 Mechanical engineering: 131 Applied mechanics, 132 Materials science, 134 Aviation and rocket-space technology; 14 Electrical Engineering: 142 Power Engineering; 15 Automation and instrumentation: 151 Automation and computerintegrated technologies,152 Metrology and information-measuring technology; 17 Electronics and telecommunications: 172 Telecommunications and radio engineering; 29 Legal sciences: 293 International law.

The Journal adhers publication ethics. Since 2016 it is integrated with the Web of Sciences and is accessed from the Web of Sciences Core Collections.

Acknowledgements. A large amount of work has been done by the journal's team to present fully research results by scientists and designers in the field of rocket-space science and technology for the period of 1995—2020. Now due to the creation of the journal's digitized archive these papers are included in various scientometrics databases, for example, Web of Sciences, NASA/SAO/ADS, Google Scholar. We are on the way to include the journal in Scopus. This long-termwork was supported by the Ukrainian branch of the International Academy of Astronautics and the Yangel Yuzhnoye State Design Office (agreements № 12/15 on 23.06.2015, № 13/17 on 11.08.2017, № 304/18 on 04.05.2018, № 6/19 on 31.05.2019 p. between Yangel Yuzhnoye SDO and the MAO NAS of Ukraine) and State Space Agency of Ukraine. Several issues (Supplements to the Journal) were digitized under the support of the Makarov National Aerospace Youth Educational Center. The Ltd. "UkrInformNauka" provided DOI and cross-references for all articles published in 1995—2015; it remains a partner of the journal till now.

Besides the authors of this paper, the active role in the preparation of the digitized database of journal publications and the website belongs to T. P. Bulba, L. V. Gladkokhata, S. S. Vavilov as well as O. V. Klymenko, V. M. Klymenko, A. D. Danilova, A. V. Yakymenko. Such work became successful with the support and participation of Prof. Ya. S. Yatskiv (MAO NAS of Ukraine), Editor-in-Chief of the Journal since 2020, as well as the Editorial Board members.

This paper is performed in the frame of the Agreement N_{\odot} 6/19 on 31.05.2019 between Yangel Yuzhnoye SDO and MAO NAS of Ukraine.

RERERENCES

- Kislyuk, V. S., Klymenko, O. V. Five years of the «Space Science and Technology» journal. *Kosm. nauka tehnol.*, 6, 5, p. 3–7 (2000). https://doi.org/10.15407/knit2000.06.003
- Kislyuk, V. S., Klymenko, V. M., Klymenko, O. V. Ten years of the «Space Science and Technology» journal. *Kosm. nauka tehnol.*, 11, Supplement2, p. 3–6 (2005). https://doi.org/10.15407/knit2005.02s.003
- 3. Kislyuk, V. S.«Space Science and Technology» journal: the 15th anniversary. *Kosm. nauka tehnol.*, 16, 1, p. 05–08 (2010). https://doi.org/10.15407/knit2010.01.005
- Klymenko, O. V., Klymenko, V. M. 100 issues of the "Space Science and Technology": statistics to reflect. *Space Sci. & Technol.*, 22, 3, p. 5–8 (2016). https://doi.org/10.15407/knit2016.03.005
- 5. Internet resource of the "Space Science and Technology" journal web-site: http://space-scitechjournal.org.ua
- Borodenkov A.M., Volkov M.V., Dormidontov A.G., Stegniy A.I. Yuri Kondratyuk the space trajectory predictor. *Kosm. Nauka technol.*, 1, Supplement 1, p. 03–18 (1995). https://doi.org/10.15407/knit1995.01s.003
- 7. Zavalishin, A.P. Who are you, Yuri Kondratyuk? Kosm. nauka tehnol., 1, Supplement 1, p. 19-24 (1995). https://doi.org/10.15407/knit1995.01s.019
- Bolotin, S., Gaiovitch, I., Khoda, O.A., Samoilenko, A., Yatskiv, Ya.S.GPS Observational Campaign in the Geodynamics Test Area "SIMEIZ-KATSIVELI": Data Processing and Results. *Kosm. nauka tehnol.*, 1, Supplement 2, p. 03–16 (1995). https://doi.org/10.15407/knit1995.02s.003
- Demchyk, M.I., Kirichenko, A.G., Kizyun, L.M., Klimik, V.U., Kudak, K.A., Matso, G.M., Starodubtseva, O.E. The observations and identification of space geosynchronous objects. *Kosm. nauka tehnol.*, 2, Supplement 1, p. 03–52 (1996). https://doi.org/10.15407/knit1996.01s.003

- Andreev, V.L., Konyukhov, S.N. M.K. Yangel chief designer of space-rocket systems. *Kosm. nauka tehnol.*, 2, Supplement 2, p. 03–64 (1996).https://doi.org/10.15407/knit1996.02s.003
- 11. Zavalishin, A.P., Datsenko, A.V. Yu. V. Kondratyuk (O.G. Shargei) the founder of cosmonautics. *Kosm. nauka tehnol.*, 3, Supplement 1, p. 03–64 (1997). https://doi.org/10.15407/knit1997.01s.003
- Lyalko, V.I., Fedorovskyi, O.D. Ukraine from space. Atlas of decoded images of the area of Ukraine from space platforms. *Kosm. nauka tehnol.*, 3, Supplement 2, p. 03–32 (1997). https://doi.org/10.15407/knit1997.02s.003
- Kucherov, V.A., Ivanov, Yu.S., Efimov, Yu.S., Berdyugin, A. V., Shakhovskoy, N. M. Ultraviolet Low-Resolution Spectropolarimeter for the Space Mission Spectrum-UV (UVSPEPOL Project). *Kosm. nauka tehnol.*, 3, Supplement 3, p. 03–27 (1997). https://doi.org/10.15407/knit1997.03s.003
- Kizyun, L.M., Kirichenko, A.G., Rudenko, S.P., Demchyk, M.I., Klimik, V.U., Kudak, K.A., Matso, G.M., Starodubtseva, O.E. Catalogue GOCKU96 of positions and orbital elements of geosynchronous space objects observed in 1996. *Kosm. nauka tehnol.*, 4, Supplement 1, p. 03–51 (1998). https://doi.org/10.15407/knit1998.01s.003
- Shkuratov, Yu.G., Kislyuk, V.S., Lytvynenko, L.M., Yatskiv, Ya.S. Model of the Moon 2004 for the «UkrSelene» project. Kosm. nauka tehnol., 10, Supplement 2, p. 03–51 (2004). https://doi.org/10.15407/knit2004.02s.003
- 16. Paton, B. E., Negoda, A. A., Yatskiv, Ya. S., Konyukhov, S. N., Kordyum, E. L., Kuntsevich, V. M., Litvinenko, L. N., Ne-moshkalenko, V. V., Prisnyakov, V. F., Trefilov, V. I., Bass, V. P., Bondarenko, S. I., Frolkis, V. V., Kordyum, V. A., Korkush-ko, O. V., Lobanov, L.M., Lyalko, V. I., Morozhenko, O. V., Pilipenko, V. V., Pokhyl, Yu. A., Yampolski, Yu. M., Cherem-nykh, O. K., Dranovsky, V. J., Fedorov, O. P., Sedykh, S. N., Vavilova, I. B. Ukrainian scientific research and technologi-cal experiments proposed for the International Space Station: brief overview. *Kosm. nauka tehnol.*, 6, 4, p. 10–19 (2000). https://doi.org/10.15407/knit2000.04.010
- 17. Paton, B.E., Vavilova, I.B., Negoda, A.A., Yatskiv, Ya.S. Important Cornerstones in the Cosmic Era. *Kosm. nauka tehnol.*, 7, 1, p. 02–92 (2001). https://doi.org/10.15407/knit2001.01.002
- 18. Vereshchak, A.P., Kot, P.A., Kozlov, V.A., Makhonin, E.I., Volokh, K.F. Ukrainian space navigation-time ensuring system: state and prospects. *Kosm. nauka tehnol.*, 7, 4, p. 12–16 (2001). https://doi.org/10.15407/knit2001.04.012
- 19. Lyalko, V.I. Present state of the art and prospects of aerospace investigations of the Earth in Ukraine. *Kosm. nauka tehnol.*, 8, 2-3, p. 29–35 (2002). https://doi.org/10.15407/knit2002.02.029
- Korotaev, G.K., Pustovoitenko, V.V., Terekhin, Yu.V., Dranovsky, V.I., Kavelin, S.S., Saltykov, Yu.D., Yemelyanov, O.L., Tsymbal, V.N., Efimov, V.B., Kurekin, A.S., Komyak, V.A., Pichugin, A.P. Thirty years of domestic space oceanology. 1. Space system Ocean—Sich. *Kosm. nauka tehnol.*, 13, 5, p. 28–43 (2007). https://doi.org/10.15407/knit2007.05.028
- 21. Brief reports on the projects of "The Target Program of the Space Scientific Research of the NAS of Ukraine for 2012–2016" in 2013. *Kosm. nauka tehnol.*, 20, 2, p. 03–51 (2014). https://doi.org/10.15407/knit2014.02.003
- 22. Tyrnov, O.F., Fedorenko, Yu.P., Dorohov, V.L. Spatio-temporal dynamics of travelling ionospheric disturbations. *Space Sci.&Technol.*, 22, 5, p. 03–70 (2016). ttps://doi.org/10.15407/knit2016.05.003
- 23. Berdnyk, O.I., Lysenko, Y.O., Kaliapin, M.D., Buhaienko, T.K. Reusable lunar lander. *Space Sci. & Technol.*, 25, 5, p. 03–10 (2019). https://doi.org/10.15407/knit2019.05.003
- 24. Degtyarev, A.V., Sheptun, A.D. Methodology, methods, and results of the first estimates of the probability of close approach between constellation satellites. *Space Sci. & Technol.*, 25, 6, p. 15–32 (2019). https://doi.org/10.15407/knit2019.06.015
- Pylypenko, O.V., Degtyarev, M.A., Nikolayev, A.D., Klimenko, D.V., Dolgopolov, S.I., Khoriak, N.V., Bashliy, I.D., Silkin, L.A. Providing of POGO stability of the Cyclone-4M launch vehicle. *Space Sci. & Technol.*, 25, 4, p. 3–20 (2020). https:// doi.org/10.15407/knit2020.04.003
- 26. Internet resource of the "Scientometrics" journal (Springer) web-site: https://www.springer.com/journal/11192
- 27. Arlekinova O.E. Study of environment parameters that determine ILV «Zenit-3SL» loading during standing before launch. Kosm. nauka tehnol. 8 (Supplement1), p. 9–11 (2002). https://doi.org/10.15407/knit2002.01s.009
- Pylypenko O.V., Degtyarev M.A., Nikolayev O.D., Klimenko D.V., Dolgopolov S.I., Khoriak N.V., Bashliy I.D., Silkin L.A. Providing of POGO stability of the Cyclone-4M launch vehicle. *Space Science and Technology*, 25(4), p. 3–20 (2020). https://doi.org/10.15407/knit2020.04.003
- 29. Alekseev Yu.S., Kukushkin V.I., Levenko A.S. Prospects of the rocket-space branch of Ukraine is the rocket system on the basis of the airborne-space vehicle. *Kosm. nauka tehnol.*, 12(4), p. 3–13 (2006). https://doi.org/10.15407/knit2006.04.003
- Konyukhov S.N., Dron N.M., Dubovik L.G., Zhuravleva L.D., Kondratyev A.I., Kulagin S.N., Petrenko A.N., Statsenko V.I., Statsenko I.N. Prospects of the use of universal transport power jet propulsion of platforms. *Kosm. nauka tehnol.*, 9(1), p. 3–007 (2003). https://doi.org/10.15407/knit2003.01.003
- Degtyarev A.V., Degtyarev M.A. Methodological aspects of design and development of space launch systems under international cooperation. *Kosm. nauka tehnol.*, 21(5), p. 07–17 (2015). https://doi.org/10.15407/knit2015.05.007
- 32. Prysiazhnyi V.I., Levenko A.S., Pauk O.L. Some aspects of creating return orbiter in the form of a remote sensing satellite and launch vehicle. *Kosm. nauka tehnol.*, 20(4), p. 3–13 (2014). https://doi.org/10.15407/knit2014.04.003

- Vidmachenko A.P., Kazantseva L.V., Morozhenko O.V., Choliy V.Ya., Nevodovsky P.V. Astronomical observations and monitoring surveys of the Earth from the surface or from the Moon's orbit and their ground support. *Space Science and Technology*, 25(5), p. 25-75 (2019). https://doi.org/10.15407/knit2019.05.025
- 34. Shkuratov Yu.G., Omel'chenko V.V., Stankevich D.G., Kaydash V.G., Pieters P., Pinet P. Prognosis of lunar surface composition from laboratory studies of lunar samples and Clementine data. *Kosm. nauka tehnol.*, 9(1), p. 54–70 (2003). https://doi.org/10.15407/knit2003.01.054
- 35. Shkuratov Yu.G, Konovalenko A.A., Zakharenko V.V. et al. Ukrainian mission to the Moon: how to and with what. *Space Science and Technology*, 24(1), p. 3–30 (2018). https://doi.org/10.15407/knit2018.01.003
- 36. Bannikova E.Yu., Kontorovich V.M. About the possibility of determining the speed of jets of radio galaxies and quasars from studies of the fine structure of their nodes at high angular resolution. *Kosm. nauka tehnol.*, 8(Supplement2), p. 304—311 (2002). https://doi.org/10.15407/knit2002.02s.304
- Vol'vach A.E., Vol'vach L.N., Kut'kin A.M. et al. Multi-frequency studies of the non-stationary radiation of the blazar 3C 454.3. Astron. Reports, vol. 55, Issue 7, p.608–615 (2011). https://doi.org/10.1134/S1063772911070092
- 38. Kostyk R.I., Osipov S.M., Lebedev N.I. The first results of the DIFOS-F experiment. *Kosm. nauka tehnol.*, 9(2-3), p. 10–12 (2003). https://doi.org/10.15407/knit2003.02.010
- 39. Stodilka M.I. Investigation of the five-minute Solar brightness oscillations: DIFOS-F experiment. *Kosm. nauka tehnol.*, 11(1–2), p. 30–36 (2005). https://doi.org/10.15407/knit2005.01.030
- 40. Shchukina N.G., Kondrashova N.M., Khomenko O.V., Kostyk R.I., Chornogor S.M., Alikaeva K.V., Olshevsky V.L., Osipov S.M., Andriyenko O.V. Construction of dynamic models of the photospheric and chromospheric layers of solar flares for studying the conditions of their appearance and evolution. *Kosm. nauka tehnol.*, 14(6), p. 52–68 (2008). https:// doi.org/10.15407/knit2008.06.052
- Ladikov-Roev Yu.P, Linnik A.A., Salnikov N.N., Cheremnykh O.K. Magneto-vortical model of coronal mass ejection. *Kosm. nauka tehnol.*,10(5-6), p. 131–134 (2004). https://doi.org/10.15407/knit2004.05.131
- 42. Mishra R.A., Mishra R.K. Semi-diurnal variation in cosmic ray intensity under different geomagnetic conditions. *Kosm. nauka tehnol.* 10(1), p. 35–40 (2004). https://doi.org/10.15407/knit2004.01.035
- Kolesnyk Yu.L, Shakhov B.A. Cosmic ray propagation in the spatially inhomogeneous interplanetary scattering medium. *Kosm. nauka tehnol.* 13 (Supplement1), p. 115–117 (2007). https://doi.org/10.15407/knit2007.01s.115
- 44. Vasylenko A.A. Future space missions: the inner region of the Solar system. *Kosm. nauka tehnol.* 23(3), p. 73-80 (2017). https://doi.org/10.15407/knit2017.03.073
- 45. Vavilova I.B. Tests of the gravitational redshift effect in space-born and ground-based experiments. *Space Sci. & Technol.* 24(1), p. 31–48 (2018). https://doi.org/10.15407/knit2018.01.031
- 46. Yatskiv Ya.S, Vavilova I.B., Romanets O.A., Savchuk V.S. Some little-known facts and events from the history of gravitational wave research in Ukraine. *Kosm. nauka tehnol.* 23(3), p. 64–72 (2017). https://doi.org/10.15407/knit2017.03.064
- Vavilova I.B., Pakuliak L.K., Protsyuk Yu.I, et al. Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO). Current state and development prospects for the Joint Archive of observations. *Kosm. nauka tehnol.* 17(4), p. 74–91 (2011). https://doi.org/10.15407/ knit2011.04.074
- Litvinenko L.N., Shulga V.M. Prospects for the development of millimeter-wave radio interferometry. *Kosm. nauka tehnol.* 8 (Supplement2), p. 293–295 (2002). https://doi.org/10.15407/knit2002.02s.293
- Konovalenko A.A., Stepkin S.V., Vasilkovskiy E.V. Low-frequency radio recombination lines: observations and data processing. *Kosm. nauka tehnol.* 23(1), p. 50–53 (2017). https://doi.org/10.15407/knit2017.01.050
- 50. Stanislavsky A.A., Konovalenko A.A., Zakharenko V.V., Bubnov I.N., Volvach Ya.S, Dorovskyy V.V., Koval A.A., Mylostna K.Yu. Coordinated synchronous observations of Solar System objects using the ground- and space-based methods of low-frequency radio astronomy. *Kosm. nauka tehnol.* 21(4), p. 51–55 (2015). https://doi.org/10.15407/knit2015.04.051

Received 10.12.2020

*І. Б. Вавилова*¹, зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук

E-mail: irivav@mao.kiev.ua

В. С. Зевако², нач. відділу навчання РК НДЦ, канд. техн. наук, доцент

E-mail: zws@ukr.net

*Л. К. Пакуляк*¹, ст. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: pakuliak@mao.kiev.ua

Л. П. Потапович², вчений секретар – нач. науково-організаційного відділу РК НДЦ, канд. техн. наук

E-mail: info@yuzhnoye.com

 ¹ Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143
 ² ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

ЖУРНАЛ «КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ»: СТАТИСТИКА І НАУКОМЕТРІЯ ЗА 1995—2020 РОКИ

У статті представлено статистичний і науко-метричний аналіз статей, надрукованих у науково-практичному журналі НАН України «Космічна наука і технологія» за період 1995—2020 рр. (127 чисел і 19 додатків). Статистичний аналіз виконано за географією розподілу установ, де працюють автори; кількістю статей за роками видань журналу та за рубриками. Проведено попередній аналіз взаємозв'язку кількості статей за різними тематиками журналу і розвитком відповідних напрямів космічних досліджень в Україні.

Ключові слова: космічні дослідження, журнал, наукометрія.

Аврамов К. В., Чернобривко М. В., Успенський Б. В. Вільні коливання функціонально-градієнтних наноармованих циліндричних оболонок. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 2. С. 23—37.

Барабанов М. О. — див. Коханов О. Б.

Белясв С. М., Дудкін Ф. Л., Проненко В. О., Корепанов В. Є. Вимірювальна система для аналізу електромагнітної сумісності малих супутників. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 4. С. 29—35.

Бердник А. И., Каляпин М. Д., Лысенко Ю. А., Бугаенко Т. К. Многоразовый лунный лэндер. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 5. С. 3—10.

Бердниченко Ю. А. — див. Стрелко О. Г.

Бугаенко Т. К. — див. Бердник А. И.

Васильев В. В., Годунок Л. А., Деркач С. В., Матвиенко С. А. Стенд для отработки и испытаний систем взаимных измерений положения двух космических аппаратов. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 1. С. 3–13.

Васильев В. В. — див. Пироженко А. В.

Венедіктов О. Ю. — див. Коханов О. Б.

Венедіктов Ю. І. — див. Коханов О. Б.

Венцковский О. М. — див. Дорожко А. И.

Відьмаченко А. П., Казанцева Л. В., Мороженко О. В., Чолій В. Я., Неводовський П. В. Астрономічні спостереження та моніторингові дослідження Землі з поверхні чи з орбіти Місяця і їхній наземний супровід. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 5. С. 25—75.

Войцеховська А. Д. — див. Федоренко А. К.

Гладкий Э. Г. Оценка риска поражения линейного объекта в случае аварии ракеты-носителя на этапе полета. *Космічна наука і технологія.* 2019. **25**, № 4. С. 22—28.

Годунок Л. А. — див. Васильев В. В.

Голубек А. В. — див. Дронь Н. М.

Грекова М. В., Калинин А. В., Джур Е. А., Носова Т. В. Комплексное модифицирование многокомпонентных сплавов. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 3. С. 25—31.

Грищак В. З. — див. Дегтяренко П. Г.

Грищак Д. Д. — див. Дегтяренко П. Г.

Гурова А. М. — див. Малишева Н. Р.

Дегтярева Е. А., Новиков А. В. Математическая модель движения ракеты относительно подвижной пусковой установки. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 3. С. 3—15.

Дегтярев А. В., Шептун А. Д. Методология, методы и результаты первых оценок вероятности сближения спутников группировки на малые расстояния. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 6. С. 15—32.

Дегтярев О. В. Круглий стіл ректорів вищих навчальних закладів і проблеми аерокосмічної освіти. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 3. С. 57—59.

Дегтяренко П. Г., Грищак В. З., Грищак Д. Д., Дьяченко Н. Н. К проблеме равноустойчивости подкрепленной оболочечной конструкции при комбинированном нагружении. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 6. С. 3—14.

Дегтяренко П. Г. — див. Дорожко А. И.

Деркач С. В. — див. Васильев В. В.

Джур Е. А. — див. Грекова М. В.

Джур €. *А*. − див. Кашенкова А. В.

Дмитренко Е. С. — див. Магдин Э. К.

Добрушина М. Г. — див. Маслей В. Н.

Дорожко А. И., Дегтяренко П. Г., Макаров А. Л., Сидорук В. О., Венцковский О. М. Сверхманевренное транспортное средство. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 5. С. 11—17.

Дреус А. Ю. — див. Дронь Н. М.

Дронь Н. М., Голубек А. В., Дреус А. Ю., Дубовик Л. Г. Перспективы использования комбинированного метода очистки околоземного пространства от крупногабаритного космического мусора. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 6. С. 61—69.

Дубовик Л. Г. — див. Дронь Н. М.

Дудкін Ф. Л. — див. Беляєв С. М.

Дьяченко Н. Н. — див. Дегтяренко П. Г.

Ефименко Н. В. Явные алгоритмы настройки силовых гироскопических комплексов кратных схем в задачах управления ориентацией космического аппарата. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 1. С. 27—37.

Жук І. Т. — див. Федоренко А. К.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

Казанцева Л. В. — див. Відьмаченко А. П.

Калинин А. В. — див. Грекова М. В.

Калініна Н. Є. — див. Кашенкова А. В.

Каляпин М. Д. — див. Бердник А. И.

Кашенкова А. В., Калініна Н. Є., Джур Є. А. Розробка пошарового лазерного спікання порошкових композицій конструкційних сталей. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 5. С. 18—24.

Кириченко С. Ю. — див. Сокол Г. И.

Кияк Н. Я. — див. Лобачевська О. В.

Клименко В. І. — див. Шевякіна Н. А.

Клюйков А. А. — див. Рыхлова Л. В.

Коваленко В. А. — див. Кондратьев А. В.

Козак Л. В. — див. Черемных О. К.

Колос Л. М. — див. Федоров О. П.

Колос Л. М. — див. Куссуль Н. М.

Кондратьев А. В., Коваленко В. А. Оптимизация проектных параметров композитного головного обтекателя ракеты-носителя при одновременном силовом и тепловом нагружении. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 4. С. 3–21.

Корепанов В. Є. — див. Беляєв С. М.

Котлов В. Ю. — див. Сокол Г. И.

Коханов О. Б., Венедіктов Ю. І., Барабанов М. О., Венедіктов О. Ю. Прилад «Піон» для вивчення іоносферної плазми на борту мікросупутника на базі платформи «YuzhSat». Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 2. С. 38—42.

Красовський Г. Я. — див. Шевякіна Н. А.

Кронберг Е. А. — див. Черемных О. К.

Крючков Є. І. — див. Федоренко А. К.

Кудреватых А. Т. — див. Маслей В. Н.

Кулик А. С. — див. Маслей В. Н.

Куссуль Н. М., Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Шуміло Л. Л., Яйлимова Г. О., Лавренюк М. С., Колос Л. М., Підгородецька Л. В. Urban Atlas для міст України на основі супутникових даних високого розрізнення. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 6. С. 51–60.

Лавренюк М. С. — див. Куссуль Н. М.

Лобачевська О. В., Кияк Н. Я., Хоркавців Я. Д. Морфофункціональні особливості клітин протонеми Weissia tortilis Spreng. з різною чутливістю до гравітації. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 2. С. 60—70.

Лялько В. И. — див. Попов М. А.

Лысенко Ю. А. — див. Бердник А. И.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

Магдин Э. К., Дмитренко Е. С., Толочьянц Г. Э., Михайлов Н. С., Филиппов В. В., Оглих В. В. Оптимизация конструкции импульсных твердотопливных ракетных двигателей с металлическими корпусами путем объединения их в моноблочный отсек, изготовленный из высокопрочного пластика. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 6. С. 33—38.

Макаров А. Л. — див. Дорожко А. И.

Малишева Н. Р., Гурова А. М. Правові форми державноприватного партнерства для космічної галузі України та відмежування його від суміжних форм договірної співпраці. *Космічна наука і технологія.* 2019. **25**, № 1. С. 73—84.

Маслей В. Н., Кавун В. В., Щудро А. П., Сохач Ю. В., Кудреватых А. Т., Рожковский В. Ф., Москалев С. И., Добрушина М. Г., Кулик А. С. Исследование крупногабаритных конструкций из композиционных материалов на терморазмеростабильность. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 3. С. 32—39.

Маслова А. И. – див. Пироженко А. В.

Матвиенко С. А. — див. Васильев В. В.

Мироненко Е. С. — див. Сокол Г. И.

Михайлов Н. С. — див. Магдин Э. К.

Мороженко О. В. — див. Відьмаченко А. П.

Москалев С. И. – див. Маслей В. Н.

Неводовський П. В. — див. Відьмаченко А. П.

Неділько О. М. — див. Сафронов О. В.

Некрасов В. Е. — див. Сокол Г. И.

Новиков А. В., Новикова Т. А. Дуальное образование: проблемы и перспективы подготовки специалистов для ракетно-космической отрасли. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 2. С. 71—76.

Новиков А. В. — див. Дегтярева Е. А.

Новикова Т. А. — див. Новиков А. В.

Носова Т. В. — див. Грекова М. В.

Оглих В. В. — див. Магдин Э. К.

Пилипчук О. Я. — див. Стрелко О. Г.

Пироженко А. В., Маслова А. И., Васильев В. В. О влиянии второй зональной гармоники на движение спутника по почти круговым орбитам. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 2. С. 3–11.

Підгородецька Л. В. — див. Федоров О. П.

Підгородецька Л. В. — див. Куссуль Н. М.

Попов М. А., Лялько В. И., Станкевич С. А. Национальная система дистанционного зондирования Земли: поиск рациональных решений. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 6. С. 39—50.

Проненко В. О. — див. Беляєв С. М.

Рожковский В. Ф. — див. Маслей В. Н.

Рыхлова Л. В., Клюйков А. А. Искусственные спутники Земли: космическая геодезия и геодинамика. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 4. С. 57—74.

Самойленко Л. І. — див. Федоров О. П.

Сафронов О. В., Семон Б. Й., Неділько О. М. Згинальнокрутильний флатер аеродинамічного профілю зі стрибками ущільнення. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 2. С. 12—22.

Семон Б. Й. — див. Сафронов О. В.

Сидорук В. О. — див. Дорожко А. И.

Сокол Г. И., Котлов В. Ю. Метод, модель и методика расчета акустических излучений двигательной установки в первые 1.5...4.1 секунды полета ракеты космического назначения. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 3. С. 16—24.

Сокол Г. И., Некрасов В. Е., Кириченко С. Ю., Мироненко Е. С., Хорищенко А. А. Визуализация акустического излучения от двигательной установки ракеты в первые секунды старта. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 4. С. 36—40.

Сохач Ю. В. — див. Маслей В. Н.

Станкевич С. А. — див. Попов М. А.

Стрелко О. Г., Пилипчук О. Я., Бердниченко Ю. А. До п'ятдесятиріччя першого експерименту зі зварювання у космосі. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 5. С. 76—84.

Ткаченко А. И. Усиленная сходимость оценок в полетной геометрической калибровке. *Космічна наука і технологія*. 2019. **25**, № 4. С. 41—47.

Толочьянц Г. Э. — див. Магдин Э. К.

Трофимчук О. М. — див. Шевякіна Н. А.

Успенський Б. В. — див. Аврамов К. В.

Федоренко А. К., Крючков Є. І., Черемних О. К., Жук І. Т., Войцеховська А. Д. Дослідження хвильових збурень у середньоширотній мезосфері за даними мережі ДНЧрадіостанцій. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 1. С. 48—61.

Федоров О. П., Самойленко Л. І., Колос Л. М., Підгородецька Л. В. Проблеми використання супутникових даних для моніторингу цілей сталого розвитку України. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 3. С. 40—56.

Филиппов В. В. — див. Магдин Э. К.

Хорищенко А. А. — див. Сокол Г. И. Хоркавців Я. Д. — див. Лобачевська О. В.

Хорошилов С. В. Алгоритм управления относительным движением в плоскости орбиты космического аппарата

для бесконтактного удаления космического мусора. *Кос*мічна наука і технологія. 2019. **25**, № 1. С. 14—26.

Черемних О. К. — див. Федоренко А. К.

Черемных О. К., Черемных С. О., Козак Л. В., Кронберг Е. А. Неустойчивость Кельвина — Гельмгольца и магнитогидродинамические моды на границе геомагнитного хвоста. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 2. С. 43—59.

Черемных С. О. — див. Черемных О. К.

Чернобривко М. В. — див. Аврамов К. В.

Черногор Л. Ф. Эффективность мониторинга катастрофических процессов космического и земного происхождения. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 1. С. 38—47.

Чолій В. Я. — див. Відьмаченко А. П.

Шевякіна Н. А., Трофимчук О. М., Красовський Г. Я., Клименко В. І. Методи і моделі космічного моніторингу зон впливу полігонів твердих побутових відходів на довкілля. Космічна наука і технологія. 2019. **25**, № 1. С. 62—72.

Шелестов А. Ю. — див. Куссуль Н. М.

Шептун А. Д. — див. Дегтярев А. В.

Шуміло Л. Л. — див. Куссуль Н. М.

Щудро А. П. — див. Маслей В. Н.

Яйлимова Г. О. — див. Куссуль Н. М.

Яйлимов Б. Я. — див. Куссуль Н. М.

Baker R. M. L., Jr. A working hypothesis on the muon-decay time shortening. Космічна наука і технологія. 2019. 25, № 3. С. 60—77.

Buglak O. see Ulytsky O.

Kushlakova N. M. see Savchuk V. S.

Lunova O. see Ulytsky O.

Savchuk V. S., Kushlakova N. M., Vavilova I. B. Nikolai Kibalchich in the history of world rocket-space technics: discussion questions of domestic and world historiography. *Космічна* наука і технологія. 2019. **25**, \mathbb{N} 6. C. 70–83.

Ulytsky O., Yermakov V., Lunova O., Buglak O. Technique for orthotransformed satellite imagery application in environmental assessment. *Космічна наука і технологія.* 2019. **25**, № 4. С. 48—56.

Vavilova I. B. see Savchuk V. S.

Yermakov V. see Ulytsky O.

XPOHIKA

«Космические технологии: настоящее и будущее» — формат будет продолжен. *Космічна наука і технологія*. 2019. 25, № 4. С. 82—93.

Агеева Л. И. — див. Дураченко В. М.

Алексеев К. Г. — див. Воронцов А. В.

Альохіна Л. В. — див. Кошовий В. В.

Артюшенко М. В., Томченко О. В. Перколяційна модель для контролю над поширенням заражень лісу за зображеннями з космічних апаратів. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 4. С. 45—56.

Балашов В. Н. — див. Воронцов А. В.

Башлий И. Д. — див. Пилипенко О. В.

Білик А. С., Гребенєва І. В. Особливості проєктування споруд в умовах Марса. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 5. С. 73—89.

Білоконська Ю. В. — див. Шелестов А. Ю.

Бриль А. И. — див. Метельская Н. С.

Васильев В. В., Годунок Л. А., Волков В. А., Мельничук С. В., Деркач С. В., Сомов А. В. О построении адаптируемой системы взаимных измерений для автономного сближения космических аппаратов с некооперируемыми космическими объектами. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 3. С. 42—54.

Васильєва І. Е. Чи є зв'язок між сонячною активністю та землетрусами? *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 5. С. 90—102.

Верховцев В. Г. — див. Покалюк В. В.

Вишневський Д. О. — див. Федонюк Т. П.

Волков В. А. — див. Васильев В. В.

Воронцов А. В., Фролов В. П., Балашов В. Н., Алексеев К. Г., Ципун И. Ю., Мокин А. В. Мобильная чистая камера для сборки головных блоков с изменяемой площадью рабочей зоны. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 1. С. 72—78.

Галинский В. П. — див. Тимошенко В. И.

Галущенко О. М. — див. Федонюк Т. П.

Ганчин В. В. — див. Мацевитый Ю. М.

Гладкий Э. Г. Определение коллективного риска в случае аварии ракеты-носителя «Циклон-4М» на этапе полета с использованием представления населенных территорий в виде многоугольников. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 3. С. 32—41.

Годунок Л. А. — див. Васильев В. В. Гребенєва І. В. — див. Білик А. С. Гуреля В. В. — див. Федонюк Т. П. Гурова А. М. — див. Малишева Н. Р.

Гусарова И. А., Манько Т. А., Роменская О. П., Литот А. В. Исследование механизма влияния плазменной обработки на свойства низкомодульных углеволокон. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 1. С. 90—99.

Гусарова І. О. — див. Манько Т. А.

Данилевський В. О. Кутові характеристики розсіювання сонячного світла земною атмосферою, спостережувані приладом «СканПол» проєкту «Аерозоль-UA». Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 6. С. 60—74.

Деркач С. В. — див. Васильев В. В.

Дзюба А. П., Сіренко В. М., Клименко Д. В., Левитіна Л. Д., Черенков Д. А. Оптимізація композитних оболонок обертання методами теорії оптимальних процесів. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 5. С. 28—37.

Долгополов С. И. – див. Пилипенко О. В.

Долинкевич А. С. — див. Дураченко В. М.

Дураченко В. М., Шпак А. В., Колесниченко С. А., Агеева Л. И., Долинкевич А. С., Унчур К. А. Проблемы и пути их решения в процессе разработки жидкостного реактивного двигателя малой тяги для жидкостной реактивной системы 3-й ступени ракеты-носителя «Циклон-4». Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 1. С. 18—29.

Дьяченко Т. М. — див. Федоровський О. Д.

Жуков О. В., — див. Федонюк Т. П.

Зимароєва А. А. — див. Федонюк Т. П. Зуб Л. М. — див. Федоровський О. Д.

Иваницкий Г. М. — див. Мочёнов Р. А.

Івантишин О. Л. — див. Кошовий В. В.

Ільїна С. М. — див. Поляков Г. А.

Ільченко М. Ю., Наритник Т. М., Присяжний В. І., Капштик С. В., Матвієнко С. А. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 4. С. 57—85.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6

Каліта Б. І. — див. Кошовий В. В.

Капштик С. В. — див. Ільченко М. Ю.

Каратаєва Л. М. — див. Кошовий В. В.

Клименко Д. В. — див. Дзюба А. П.

Колесниченко С. А. — див. Дураченко В. М.

Кондратьєв А. В. Концепція оптимізації конструктивнотехнологічних параметрів композитних агрегатів ракетно-космічної техніки з урахуванням особливостей їхнього виробництва. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 6. С. 5—22

Корепанов В. Е. — див. Лизунов Г. В.

Костиков А. О. – див. Мацевитый Ю. М.

Кошовий В. В., Івантишин О. Л., Ногач Р. Т., Чорногор Л. Ф., Назарчук З. Т., Мельник М. О., Каліта Б. І., Харченко Б. С., Романишин І. М., Лозинський А. Б., Русин Б. П., Каратаєва Л. М., Любінецький З. І., Альохіна Л. В., Ліпський В. К. Штучна акустична модифікація навколоземного середовища. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 2. С. 19—58.

Кулагин С. Н. — див. Шувалов В. А.

Кулик А. С. — див. Одайский С. А.

Левитіна Л. Д. — див. Дзюба А. П.

Лизунов Г. В., Скороход Т. В., Корепанов В. Е. Атмосферные гравитационные волны в ряду физических механизмов сейсмоионосферной связи. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 3. С. 55—80.

Лизунов Г. В. — див. Пьянкова Е. В.

Литот А. В. — див. Гусарова И. А.

Ліпський В. К. — див. Кошовий В. В.

Лозинський А. Б. — див. Кошовий В. В.

Ломакін І. Е. — див. Покалюк В. В.

Любінецький З. І. — див. Кошовий В. В.

Ляшенко В. В., Яцун Л. В., Ярмольчук Е. Д. Планирование съемки космическим аппаратом «Січ-2М». Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 1. С. 30—36.

Лящук А. И. — див. Черногор Л. Ф. (*a*)

Малишева Н. Р., Гурова А. М. Моделі правового регулювання діяльності у сфері дистанційного зондування Землі у світі: досвід для України. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 4. С. 86—110.

Манько Т. А., Гусарова І. О., Потапов О. М., Солодкий Є. В. Вплив наномодифікаторів на властивості вуглекомпозитів. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 5. С. 15—21.

Манько Т. А. — див. Гусарова И. А.

Марченко В. Т. — див. Петляк О. А.

Матвієнко С. А. — див. Ільченко М. Ю.

Матус Г. В. — див. Поляков Г. А.

Мацевитый Ю. М., Сиренко В. Н., Костиков А. О., Сафонов Н. А., Ганчин В. В. Методика идентификации нестационарных тепловых процессов в многослойных конструкциях. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 1. С. 79—89.

Меланченко А. Г. — див. Пьянкова Е. В.

Мельник М. О. — див. Кошовий В. В.

Мельничук С. В. — див. Васильев В. В.

Мельничук Т. В. — див. Федонюк Т. П.

Метельская Н. С., Бриль А. И., Чайковский А. П., Федоренко А. С., Милиневский Г. П. Комплексный спутниковый и наземный региональный мониторинг атмосферного аэрозоля лидарными и радиометрическими системами с использованием ассимиляции данных. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 1. С. 59—71.

Милиневский Г. П. — див. Метельская Н. С.

Мокин А. В. — див. Воронцов А. В.

Мочёнов Р. А., Сотниченко А. В., Иваницкий Г. М., Сало М. П. Исследование температурного и силового воздействия сверхзвуковых струй ракет космического назначения на газоход стартового комплекса при работе системы водоподачи. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 3. С. 3—19.

Назарчук З. Т. — див. Кошовий В. В.

Наритник Т. М. – див. Ільченко М. Ю.

Николаев А. Д. — див. Пилипенко О. В.

Николин С. А., Сокол Г. И. Влияние газодинамических процессов на акустическое излучение при взаимодействии реактивной струи газа с плоской преградой. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 3. С. 20—31.

Нів'євський О. В. — див. Шелестов А. Ю.

Ногач Р. Т. — див. Кошовий В. В.

Одайский С. А., Потапов А. М., Федоренко С. В., Щудро А. П., Кулик А. С. Спосіб виготовлення труб з полімерних композиційних матеріалів для конструкцій літальних апаратів. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 5. С. 22—27.

Петляк О. А., Марченко В. Т. Про один із підходів до оцінки технічного рівня геостаціонарних супутників зв'язку. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 5. С. 5—14.

Печерица Л. Л., Смелая Т. Г. Оптимизация сеточной структуры при использовании статистического метода пробных частиц в задачах разреженной газовой динамики. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 1. С. 48—58.

Пилипенко О. В., Николаев А. Д., Башлий И. Д., Долгополов С. И. Математическое моделирование динамичес-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 6
ких процессов в системе питания маршевого двигателя космических ступеней ракет-носителей на активных и пассивных участках траектории полета. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 1. С. 3—17.

Покалюк В. В., Ломакін І. Е., Верховцев В. Г. Балтійсько-Іранський суперлінеамент — довгоживучий трансєвразійський пояс дислокацій і планетарної мегатріщинуватості. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 5. С. 48—72.

Поляков Г. А., Матус Г. В., Ільїна С. М., Фесенко Є. Ю. Результати дослідного застосування класифікатора підприємства «Класифікатор помилок у конструкторській документації» під час нормоконтролю конструкторської документації. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 2. С. 84—92.

Потапов А. М. — див. Одайский С. А.

Потапов О. М. — див. Манько Т. А.

Поштаренко Ю. А., Рассамакін Б. М., Сидоренко Ю. М., Хомініч В. І., Шевченко М. Д. Дослідницько-випробувальний експериментальний термовакуумний стенд ТВК-2,5. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 6. С. 23—26.

Присяжний В. І. — див. Ільченко М. Ю.

Протас А. Н. — див. Пьянкова Е. В.

Пьянкова Е. В., Лизунов Г. В., Меланченко А. Г., Протас А. Н. Информационная система сбора, обработки и распространения данных для геокосмических спутниковых проектов. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 1. С. 37—47.

Рассамакін Б. М. — див. Поштаренко Ю. А.

Романишин І. М. — див. Кошовий В. В.

Роменская О. П. — див. Гусарова И. А.

Русин Б. П. — див. Кошовий В. В.

Сало М. П. — див. Мочёнов Р. А.

Сафонов Н. А. — див. Мацевитый Ю. М.

Сидоренко Ю. М. — див. Поштаренко Ю. А.

Симанов В. Г. — див. Шувалов В. А.

Сиренко В. Н. – див. Мацевитый Ю. М.

Сіренко В. М. — див. Дзюба А. П.

Скороход Т. В. — див. Лизунов Г. В.

Смелая Т. Г. — див. Печерица Л. Л.

Сокол Г. И. — див. Николин С. А.

Солодкий Є. В. — див. Манько Т. А.

Сомов А. В. — див. Васильев В. В.

Сотниченко А. В. — див. Мочёнов Р. А.

Тимошенко В. И., Галинский В. П. Математическое моделирование процессов аэрогазотермодинамики сверхзву-

кового летательного аппарата с прямоточным воздушнореактивным двигателем. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2. С. 3—18.

Ткаченко О. І. Варіант прив'язки наземних об'єктів за одним космічним знімком. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 4. С. 38—44.

Томченко О. В. — див. Артюшенко М. В.

Томченко О. В. — див. Федоровський О. Д.

Унчур К. А. — див. Дураченко В. М.

Федонюк Т. П., Галущенко О. М., Мельничук Т. В., Жуков О. В., Вишневський Д. О., Зимароєва А. А., Гуреля В. В. Перспективи та основні аспекти застосування ГІСтехнологій для моніторингу біологічного різноманіття (на прикладі Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника). Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 6. С. 75–93.

Федоренко А. С. – див. Метельская Н. С.

Федоренко С. В. — див. Одайский С. А.

Федоренко Ю. П. Залежність просторового періоду рухомих іоносферних збурень від їхньої відносної амплітуди. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 6. С. 38—59.

Федоровський О. Д., Зуб Л. М., Дьяченко Т. М., Томченко О. В., Хижняк А. В., Якимчук В. Г. Дистанційне оцінювання екологічного стану водойм на основі багатовимірної щільності розподілу площ біотопів на прикладі Київського водосховища. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 5. С. 38—47.

Фесенко Є. Ю. — див. Поляков Г. А. *Фролов В. П.* — див. Воронцов А. В.

Харченко Б. С. — див. Кошовий В. В.

Хижняк А. В. — див. Федоровський О. Д.

Хомініч В. І. — див. Поштаренко Ю. А.

Хорольский П. Г. — див. Шувалов В. А.

Ципун И. Ю. — див. Воронцов А. В.

Чайковский А. П. – див. Метельская Н. С.

Черенков Д. А. — див. Дзюба А. П.

Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Временной и системный спектральный анализы инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных в течение техногенной катастрофы. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 3. С. 81—96. (*a*)

Черногор Л. Ф., Шевелев Н. Б. Широтная зависимость квазипериодических вариаций геомагнитного поля в течение сильнейшей геокосмической бури 7—9 сентября 2017 года. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 2. С. 72—83. (б) Чорногор Л. Ф. — див. Кошовий В. В.

Шевелев Н. Б. — див. Черногор Л. Ф. (*a*)

Шевелев Н. Б. — див. Черногор Л. Ф. (б)

Шевченко М. Д. – див. Поштаренко Ю. А.

Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Яйлимова Г. О., Білоконська Ю. В., Нів'євський О. В. Супутниковий моніторинг посівів по Україні. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 6. С. 27—37.

Шпак А. В. — див. Дураченко В. М.

Шувалов В. А., Симанов В. Г., Хорольский П. Г., Кулагин С. Н. О торможении искусственно «намагниченного» космического аппарата в ионосферной плазме. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 2. С. 59—71.

Щудро А. П. – див. Одайский С. А.

Якимчук В. Г. — див. Федоровський О. Д.

Яйлимова Г. О. — див. Шелестов А. Ю.

Яйлимов Б. Я. — див. Шелестов А. Ю.

Ярмольчук Е. Д. — див. Ляшенко В. В.

Яцун Л. В. — див. Ляшенко В. В.

Baray S. G. – see Ilyushchanka A. Ph.

Bashliy I. D. - see Pylypenko O. V.

Degtyarev M. A. - see Pylypenko O. V.

Dolgopolov S. I. - see Pylypenko O. V.

Fedorovskyi O. D. - see Khyzhniak A. V.

Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Baray S. G., Savich V. V. Materials and technologies of powder metallurgy in the components of missile and space engineering. Prospects of development. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, \mathbb{N} 4. C. 21—30.

Khoriak N. V. - see Pylypenko O. V.

Khyzhniak A. V., Fedorovskyi O. D. Integration of remote sensing data and ground-based information to solve natural resources and environmental problems. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, \mathbb{N} 4. С. 31–37.

Klimenko D. V. – see Pylypenko O. V.

Kryvanos A. K. - see Ilyushchanka A. Ph.

Nikolayev O. D. – see Pylypenko O. V.

Pakuliak L. K. – see Vavilova I. B.

Potapovych L. P. – see Vavilova I. B.

Руlуренко О. V., Degtyarev M. A., Nikolayev O. D., Klimenko D. V., Dolgopolov S. I., Khoriak N. V., Bashliy I. D., Silkin L. A. Providing of POGO stability of the Cyclone 4M launch vehicle. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 4. C. 3-20.

Savich V. V. – see Ilyushchanka A. Ph.

Silkin L. A. - see Pylypenko O. V.

Vavilova I. B., Zievako V. S., Pakuliak L. K., Potapovych L. P. "Space Science and Technology" journal: Statistics and Scientometrics for 1995—2020 years. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 6. С. 94—103.

Zievako V. S. – see Vavilova I. B.

XPOHIKA

До 70-річчя від дня доктора фізико-математичних наук професора ЧОРНОГОРА Леоніда Феоктистовича. *Космічна наука і технологія.* 2020. **26**, № 2. С. 93—94.

Професор Єлизавета Кордюм — член Зали слави Міжнародної астронавтичної федерації. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 2. С. 95.

Слово про Бориса Євгеновича Патона. Космічна наука і технологія. 2020. 26, № 5. С. 3.

Пам'яті Михайла Івановича Міщенка (1959—2020). Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 5. С. 4.

Слово пам'яті про Олександра Вікторовича Дегтярева. Космічна наука і технологія. 2020. **26**, № 6. С. 3—4.