

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

CONTENTS

Space Materials and Technologies

3MICT

Космічні матеріали та технології

Ющенко К. А., Яровицин О. В., Хрущов Г. Д., Петрик І. А., Чигилейчик С. Л. Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням	3	Yushchenko K. A., Yarovytsyn O. V., Khrushchov G. D., Petrik I. A., Chygileichyk S. L. Research and optimiza- tion of refurbishment of HPT blades of the D-18T air- craft gas turbine engine by micro-plasma powder weld- ing	3
Дослідження Землі з космосу		Study of the Earth from Space	
Білоусов К. Г., Нечипорук М. В., Хорошилов В. С., Свина- ренко Д. М., Мозговий Д. К., Попель В. М. Метод авто- матизованої корекції приладових спотворень на бага- тоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7»	17	Bilousov K. G., Nechyporuk M. V., Khoroshylov V. S., Svynarenko D. M., Mozgovoy D. K., Popel' V. M. Method of automated correction of instrument distortions on Landsat-7 multispectral satellite images	17
Лялько В. І., Попов М. О., Седлерова О. В., Хиж- няк А. В. Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної ака- демії наук України: шлях довжиною 30 років	29	<i>Lyalko V. I., Popov M. O., Sedlerova O. V., Khyzhniak A. V.</i> Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Acad- emy of Sciences of UkraineE: a 30-year-old road	29
Космічна навігація та зв'язок		Space Navigation and Communications	
Пільтяй С. І., Булашенко А. В., Поліщук А. В., Була- шенко О. В. Хвилевідний НВЧ-поляризатор для ан- тен супутникового зв'язку з коловою поляризацією	43	<i>Piltyay S. I., Bulashenko A. V., Polishchuk A. V., Bulash- enko O. V.</i> Microwave waveguide polarizer for satellite communication antennas with circular polarization	43
Космічна й атмосферна фізика		Space and Atmospheric Physics	
<i>Luo Y., Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г.</i> Іоносферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур	62	<i>Luo Y., Chernogor L. F., Zhdanko Ye. H.</i> Ionospheric effects from rocket launches against the background of geospace storms	62
Космічна геоінформатика та геодезія		Space Geoinformatics and Geodesy	
Согор А. Р., Зазуляк П. М. Картографування еколо- гічного забруднення повітря міста Львів	86	Sohor A. R., Zazuliak P. M. Mapping of environmental pollution of air in Lviv.	86

На першій сторінці обкладинки — Фрагмент знімка із супутника «Ландсат-7» (див. статтю К. Г. Білоусова та ін., С. 17—28)

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 18.07.2022. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 9,66. Обл.-вид. арк. 10,14. Тираж 50 прим. Зам. № 6666.

Видавець і виготовлювач ВД «Академперіодика» НАН України вул. Терещенківська, 4, м. Київ, 01024

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

Космічні матеріали та технології

Space Materials and Technologies

https://doi.org/10.15407/knit2022.03.003 УДК 621.791.(92+046), 669.245, 53.083.92

К. А. ЮЩЕНКО¹, акад. НАН України, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0002-6276-7843 O. В. ЯРОВИЦИН¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук ORCID 0000-0001-9922-3877 E-mail: yarovytsyn@ukr.net Г. Д. ХРУЩОВ¹, мол. наук. співроб. ORCID 0000-0002-4045-3587 I. А. ПЕТРИК², голов. зварник, канд. техн. наук ORCID-0000-0001-6600-1661 C. Л. ЧИГИЛЕЙЧИК², нач. бюро зварювання ORCID 0000-0002-2372-9078 ¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України

вул. Казимира Малевича 11, Київ, Україна, 03150 ² Акціонерне товариство «МОТОР СІЧ» пр-т Мотобудівників 15, Запоріжжя, Україна, 69068

ДОСЛІДЖЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ СЕРІЙНОГО РЕМОНТУ РОБОЧИХ ЛОПАТОК АВІАЦІЙНОГО ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА Д-18Т МІКРОПЛАЗМОВИМ ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

Розглянуто особливості серійного ремонту робочих лопаток турбіни високого тиску авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т з обмежено зварюваного нікелевого жароміцного сплаву ЖС32-ВИ способом мікроплазмового порошкового наплавлення. Показано, що зі збільшенням тривалості експлуатації даних лопаток понад 6...8 тис. год у зварному з'єднані «основний — наплавлений метал» відновлених бандажних полиць збільшується схильність до утворення тріщин при зварюванні плавленням та наступній термічній обробці.

Показано, що забезпечення стабільного формування наплавленого валика на поверхню торців бандажних полиць даних робочих лопаток вимагає використання нестаціонарних імпульсних режимів зварювального струму прямої полярності. З урахуванням значної кількості технологічних параметрів розглянутого процесу суб'єктивний аналіз таких режимів вкрай складний. Викладено методику уточнення вимог до таких режимів одношарового мікроплазмового порошкового наплавлення в діапазоні діючих струмів 7...20 А за критеріями ефективної теплової потужності дуги та погонної енергії, що передбачає використання системи реєстрації і подальшої цифрової обробки залежності зварювального струму від часу наплавлення бандажної полиці. На основі аналізу статистичних даних з кількісної оцінки схильності дослідженого зварного з'єднання до утворення тріщин встановлено оптимальний діапазон середніх значень цих узагальнених параметрів режимів наплавлення для використання в ручному та роботизованому процесі, при якому в кінці технологічного циклу фіксується не більше декількох відсотків відновлених лопаток з виявленими тріщинами.

Показано, що суттєвими технологічними факторами, що впливають на кількість технологічного браку при відновленні розглянутих робочих лопаток, є середня величина діючого зварювального струму та якість присадного порошку ЖСЗ2, яка в першу чергу характеризується середньоваговим вмістом кисню і азоту в його дисперсних частках. Показано, що

Цитування: Ющенко К. А., Яровицин О. В., Хрущов Г. Д., Петрик І. А., Чигилейчик С. Л. Дослідження і оптимізація процесу серійного ремонту робочих лопаток авіаційного газотурбінного двигуна Д-18Т мікроплазмовим порошковим наплавленням. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 3—16. https://doi.org/10.15407/knit2022.03.003

збільшення середньовагового вмісту газових домішок у присадному порошку, передусім кисню, викликає суттєве зростання енерговитрат на формування наплавленого валика у процесі мікроплазмового порошкового наплавлення. Запропоновано методику вхідного контролю якості присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ в умовах серійного ремонтного виробництва, основану на визначенні середньовагового вмісту кисню та азоту за методикою відновного плавлення у потоці газу-носія та за критерієм оцінки середніх значень ефективної теплової потужності дуги та погонної енергії наплавлення при відновленні декількох лопаток-свідків та їхньої відповідності попередньо встановленому оптимальному діапазону.

Наведено аналіз перспектив подальшого застосування систем реєстрації і аналізу режимів наплавлення в умовах серійного ремонту деталей авіаційних газотурбінних двигунів з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів.

Ключові слова: мікроплазмове порошкове наплавлення, серійний ремонт робочих лопаток турбіни високого тиску (TBT), нікелевий жароміцний сплав ЖС32-ВИ, схильність до утворення тріщин, присадний порошок, наплавлений метал, вміст кисню та азоту, система реєстрації і аналізу режимів наплавлення, ефективна теплова потужність дуги, погонна енергія наплавлення.

ВСТУП

Більше 10 років на АТ «МОТОР СІЧ» для ремонту авіаційних робочих лопаток (РЛ) з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів (НЖС) з направленою структурою ЖС26-ВИ та ЖС32-ВИ (рис. 1, табл. 1), що належать до сучасних матеріалів авіаційно-космічного призначення та працюють в умовах експлуатації за температури 1000...1050 °C, успішно застосовується мікроплазмове порошкове наплавлення (МПН) на спеціалізованому обладнанні фірми «Кепnametal Stellite» [4, 12]. В даному процесі використовується стиснена малоамперна дуга прямої полярності, в стовп якої вводиться присадний порошок з розмірами часток 63...160 мкм, що попередньо отримується шляхом сухого розпилення потоком аргону. Типовий приклад вигляду якісної (без утворення тріщин) структури зварного з'єднання «основний — наплавлений метал» наведено на рис. 1, в.

Серійне ремонтне виробництво ставить задачі з отримання стабільної якості відновлених деталей, зокрема — після відпрацювання ними кількох міжремонтних ресурсів. Однією з складових вирішення даної задачі є формування універсальних вимог до типових технологічних рішень при відновленні РЛ турбіни високого тиску (ТВТ) авіаційного газотурбінного двигуна (ГТД) Д-18Т з НЖС ЖС32-ВИ з вмістом зміцнювальної γ'-фази понад 60 об. % способом МПН.

Відповідно, є актуальним формування уявлень про границі діапазону показників кількості тепловкладень у виріб, що є узагальненими параметрами даного процесу дугового наплавлення при відновленні розмірів бандажних полиць, і характеризують такий рівень і способи дозування тепловкладень у виріб, при яких одночасно забезпечуються якісне формування металу, що наплавляється, і технологічна міцність зварного з'єднання «основний — наплавлений метал». В свою чергу, під забезпеченням технологічної міцності на окремій РЛ ТВТ з НЖС ЖС32-ВИ в нашому випадку розумілася відсутність схильності до утворення тріщин як у процесі зварювання плавленням, так і при наступних термічних обробках, що притаманні важкозварюваним НЖС [9, 10, 20].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою даної роботи є викладення нових технологічних підходів, пов'язаних з оцінкою і зниженням кількості тепловкладень у виріб, та спрямованих на оптимізацію якості (зниження схильності до утворення тріщин) при серійному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД з важкозварюваного НЖС ЖС32-ВИ з напрацюванням більше 6...8 тис. год, що засновані на застосуванні системи реєстрації і аналізу режимів МПН.

Основні задачі для дослідження процесу МПН з неперервним подаванням присадного порошку зі сплаву ЖС32-ВИ в межах однієї номенклатури деталей, що ставилися в даній роботі:

 – формування уявлень про взаємозв'язок узагальнених технологічних параметрів (ефективної теплової потужності дуги та погонної енергії) зі схильністю до утворення тріщин у зварних з'єднаннях «основний — наплавлений метал»;

 визначення оптимального діапазону даних енергетичних показників з метою його викорис-



Рис. 1. Ескіз зони ремонту (*a*), зовнішній вид (б) РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з наплавленими торцями бандажних полиць (місце наплавлення вказано стрілками) та типовий вигляд зварного з'єднання «основний (*I*) — наплавлений метал (*2*)» сплаву ЖС32-ВИ в зоні ремонту (*в*) за даними растрової електронної мікроскопії

Caraa		Bar. %												
Сплав	С	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Мо	W	Nb	Та	Re	Fe	В	V
ЖС26-ВИ	0.13 0.18	4.3 5.6	Осн.	8.0 10.0	5.5 6.2	0.8 1.2	0.8 1.4	11.0 12.5	1.4 1.8	_	_	_	_	0.8 1.2
ЖС32-ВИ	0.12 0.18	4.3 5.6	Осн.	8.0 10.0	5.6 6.3	—	0.8 1.4	7.8 9.5	1.4 1.8	3.5 4.5	3.5 4.5	<1.0	< 0.02	—

Таблиця 1. Вміст основних легуючих елементів у нікелевих жароміцних сплавів ЖС26-ВИ та ЖС32-ВИ

тання при створенні програм режимів для наступної роботизації;

 – аналіз перспектив застосування систем збору даних для вирішення актуальних задач серійного ремонту деталей авіаційних ГТД ручним та роботизованим наплавленням.

Відомо, що особливості зміни необхідної сили зварювального струму на локальній ділянці кромки РЛ у процесі її дугового наплавлення зумовлені технічними можливостями системи керування зварювальним струмом на спеціалізованому обладнанні [12, 18], а також її геометрією. Аналіз попередньо опублікованих робіт з технологічного застосування плазмових дуг прямої полярності [2, 4, 17, 18] свідчить про те, що для процесу МПН додатковими факторами варіювання стаціонарних параметрів режиму є діаметри каналів сопел і конструкція соплового вузла плазмотрону; витрати технологічних газів; склад захисного газу (система Ar + (0...10 %) H₂); вид подавання присадного матеріалу; довжина дуги та ін. Вплив перерахованих факторів в умовах неперервного або періодичного технологічного керування силою зварювального струму ускладнює суб'єктивний аналіз як окремих режимів МПН, так і їхньої сукупності. Це, відповідно, значною мірою ускладнює встановлення взаємозв'язку з якістю зварних з'єднань «основний — наплавлений метал», що у першу чергу зумовлена відсутністю тріщин у зоні відновлювального ремонту РЛ. Тому актуальна необхідність формування нових підходів до об'єктивної оцінки технологічної множини режимів МПН, засновані на визначенні кількості теплової енергії, введеної у виріб-анод за час горіння мікроплазмової дуги.

В нашому випадку об'єктом дослідження була технологія серійного ремонту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з експлуатаційним напрацюванням більше 6...8 тис. год. Предметом дослід-

жень — зареєстровані за час виконання t одношарового наплавлення торців бандажних полиць цих РЛ циклограми сили зварювального струму i(t), а також взаємозв'язок їхніх узагальнених показників з кількістю придатних та бракованих (за критерієм наявності тріщин) РЛ, визначених капілярним контролем ЛЮМ-10В в кінці технологічного циклу відновлювального ремонту. Попередній виробничий досвід показав, що для зазначених РЛ у процесі їхнього подальшого відновлювального ремонту із застосуванням способу МПН суттєво зростає схильність до утворення тріщин. Більшість з них виявлялося капілярним контролем ЛЮМ-10В тільки після проходження повного циклу технологічних операцій (МПН, термічна та механічна обробка та ін.), через 2-3 тижні після виконання наплавлень, що негативно впливало на ритмічність та ефективність роботи ремонтного виробництва. Имовірно, погіршення зварюваності сплаву ЖС32-ВИ пов'язане з попередньо встановленим [5] збагаченням його у'-фази тугоплавкими елементами W, Re, Ta, Cr при збільшенні тривалості експлуатації РЛ ТВТ на авіаційному ГТД Д-18Т та попередньо встановленою більшою чутливістю до утворення тріщин району лінії сплавлення зварного з'єднання «основний — наплавлений метал» порівняно з безпосередньо наплавленим металом [16]. Наведені нижче дослідження ґрунтувалися на припущенні про можливість вирішення поставленої задачі підвищення стабільності якості серійного ремонту шляхом введення більш жорстких вимог до режимів МПН, порівняно з попередньо відомими обмеженнями середньої сили зварювального струму ($\bar{I}_{\pi} < 20$ A, [14]), що попередньо застосовувалися для відновлення даних РЛ ТВТ з експлуатаційним напрацюванням менше 6...8 тис. год.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Для реєстрації режимів МПН РЛ ТВТ зі сплаву ЖС32-ВИ використовувалася система збору даних у складі: безконтактного давача струму фірми LEM ($I_{HOM} = 100$ A), розташованого на ділянці зварювального контуру «+» джерела живлення — виріб; давача напруги фірми LEM з гальванічною розв'язкою контуру, що дозволяв з високою точністю вимірювати напругу в діапазоні 20...30 В; аналого-цифрового перетворювача (АЦП) m-DAQ14, що дозволяв здійснювати реєстрацію зварювального струму та напруги з частотою 1...10 кГц та загальною тривалістю до 200...250 с; ноутбука для збереження у вигляді цифрового ряду записаних файлів режимів МПН та їхньої подальшої обробки та аналізу.

При первинній обробці осцилограм зварювального струму і напруги сигнали амплітудою до 2 В, виміряні у зварювальному контурі за допомогою датчиків з гальванічною розв'язкою безпосередньо у процесі МПН РЛ і записані у вигляді цифрового ряду, перемножувалися на попередньо встановлений калібрувальний коефіцієнт. Таким чином визначалися і візуально аналізувалися залежності i(t) та U(t), а також з прийнятною точністю встановлювалося значення часу t, витрачене на безпосередньо процес наплавлення бандажної полиці РЛ. Зовнішній вигляд фрагменту осцилограми зварювального струму установки STARWELD РТА 190Н після її первинної обробки наведено на рис. 2, a.

Встановлено, що типова осцилограма зварювального струму при відпрацьованих режимах ручного одношарового наплавлення бандажної полиці має вигляд нестаціонарного періодичного процесу тривалістю до 100...150 с. Практично такий режим реалізується зварювальником-оператором шляхом накладення періодичних керівних дій через пульт дистанційного керування на вихідний стаціонарний режим горіння імпульсної мікроплазмової дуги. Реалізація таких достатньо складних режимів викликана необхідністю прецизійного дозування теплової енергії малоамперної дуги у процесі наплавлення шару металу висотою 2...3 мм для забезпечення наведених нижче характеристик наплавленого валика в різних локальних зонах торця бандажної полиці РЛ, зокрема при зміні ширини її поверхні. Це утримання зварювальної мікрованни на поверхні торця бандажної полиці, що наплавляється в умовах вільного формування, зокрема шляхом зменшення глибини проплавлення основного металу (не більше 1.5 мм). А також обмеження ширини мікрованни і, відповідно, бокових підсилень наплавленого валика, у ме-



Рис. 2. Фрагменти запису режиму при відновленні торця бандажної полиці РЛ ТВТ авіаційного двигуна Д-18Т присадним порошком сплаву ЖС32-ВИ: *a* — зареєстрований зварювальний струм після первинної обробки; *б*, *в* — гео-

метричне визначення об'єктивних показників $\int_{0}^{t} i(t) \cdot U(t) dt$ та $\int_{0}^{t} i(t) dt$ на основі визначеного інтегралу за часом t

жах до 0.5...1.5 мм на сторону (див. рис. 1, б), виходячи з ряду технологічних міркувань — зокрема зниження трудомісткості подальшої механічної обробки наплавленого валика.

Попередні дослідження [16, 18] показали, що погонна енергія є важливою узагальненою характеристикою режимів МПН при відновленні НЖС вузької основи [17]. Для відповідних зварних з'єднань «основний — наплавлений метал» сплаву ЖС32-ВИ цей показник достатньо однозначно визначає схильність до утворення тріщин в процесі наплавлення та наступної термічної обробки.

Аналіз зареєстрованих осцилограм параметрів режимів наплавлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т показав, що об'єктивними (отриманими цифровою обробкою зареєстрованого сигналу) показниками кількості теплової енергії, внесеної у виріб при реалізації процесу МПН, можуть бути: 1) діюче (ефективне) значення сили зварювального струму:

$$\bar{I}_{\mu} = \sqrt{\frac{\int_{0}^{t} i(t)dt}{t}} \quad [A], \tag{1}$$

2) визначений інтеграл електричної потужності мікроплазмової дуги (кількість електричної енергії, витраченої на її горіння у процесі наплавлення тривалістю *t*):

$$Q^{\rm E} = \int_{0}^{t} i(t) \cdot u(t) dt \ [\texttt{Д} \texttt{x}], \qquad (2)$$

3) визначений інтеграл сили зварювального струму (кількість електричного заряду, що пройшов через дуговий проміжок катод — анод в процесі наплавлення тривалістю *t*):

$$Q^{\mathrm{I}} = \int_{0}^{1} i(t)dt , [\mathrm{A} \cdot \mathrm{c}], \operatorname{afo} [\mathrm{K}\pi]$$
(3)

з огляду на те, що для мікроплазмової дуги у досліджуваному діапазоні зварювальних струмів $I_{\pi} =$ = 1...35 А спостерігається наступна закономірність $\Delta U \ll \Delta I$ ta $U(t) \approx 22.5$ B. Графічну інтерпретацію визначених інтегралів [1] електричної потужності мікроплазмової дуги та зварювального струму представлено на рис. 2, б, в у вигляді площі фігури під відповідними залежностями у часі.

Середню погонну енергію на основі повної електричної дуги при МПН РЛ ТВТ можна при відомій довжині L наплавленого валика можна визначити з виразу

$$\frac{\overline{U \cdot I}}{v} = \frac{1}{t} \cdot \int_{0}^{t} \frac{i(t) \cdot u(t)}{v(t)} dt = Q^{\mathrm{E}} / L .$$
(4)

Практичний інтерес з точки зору дослідження взаємозв'язку між кількістю тепловкладень у виріб Q_{Σ} і схильністю до утворення тріщин становить уточнення величини середньої погонної енергії $q_{\rm B}/v$ з урахуванням ефективного ККД нагріву виробу _п [16—18] для умов МПН РЛ:

$$Q_{\Sigma} = \eta_{\rm B} \cdot Q^{\rm E} \,, \tag{5}$$

$$\overline{q_{\rm B}/\nu} = Q_{\Sigma}/L.$$
(6)

Згідно з теорією теплових процесів при зварюванні М. М. Рикаліна [8] ефективна теплова потужність $q_{\rm B}$ характеризує певну частину електричної потужності дуги, що витрачається в одиницю часу на нагрівання виробу. З урахуванням адитивності тепловкладень їхня кількість визначається як $Q_{\Sigma} = \int_{0}^{t} q_{\rm B}(t) dt \; ,$

або

 $Q_{\Sigma} = q_{\rm B} t$ при $i(t) = {\rm const.}$ (8)

Відомо [2, 3, 6—8, 17, 18], що $q_{\rm B} = f(I)$. Для стиснених дуг прямої полярності у межах діапазону зварювальних струмів, обмеженого значеннями мінімального струму стабільного горіння дуги $I_{\rm min}$ та максимального струму $I_{\rm max},$ при якому забезпечується тепловий режим роботи плазмотрона $\Pi B = 100 \%$, ефективну теплову потужність дуги прийнято апроксимувати лінійною залежністю [2, 3, 6-8, 17, 18]:

$$q_{\rm B} = k_q \overline{I} + c_q \quad [\rm BT], \tag{9}$$

де \overline{I} — середнє значення сили зварювального струму, k_a і c_a — коефіцієнти лінійної апроксимації, обчислені на основі експериментальних даних з проточного калориметрування стисненої дуги на водоохолоджуваному мідному аноді [2]. Для умов процесу МПН (від $\overline{I} = 1...2$ А до \overline{I} = 30...35 A) використання лінійної апроксимації функції $q_{\rm p} = f(I)$ дає такі переваги:

• достатньо просте і однозначне експериментальне визначення коефіцієнтів k_a і c_a за методикою проточного калориметрування [2, 17] практичного для будь-якого набору стаціонарних технологічних параметрів мікроплазмової дуги;

• збереження для імпульсного зварювального струму в діапазоні частот 0.3...3.0 Гц властивості адитивності теплової енергії, що дозволяє визначати загальні тепловкладення у виріб як сукупну дію імпульсів та пауз;

• обмеження систематичних відхилень значенням +10 % між оціненими за методикою проточного калориметрування і реальними тепловкладеннями у виріб у процесі МПН [19] і в однакових умовах горіння мікроплазмової дуги.

Виходячи з фізичного сенсу ефективної теплової потужності дуги (7)—(9), величину тепловкладень у виріб і середню погонну енергію з урахуванням ефективного ККД нагріву за час *t* горіння дуги можна визначити як

$$Q_{\Sigma} = \int_{0}^{t} q_{\rm B}(t) dt = k_q \int_{0}^{t} i(t) dt + c_q t , \qquad (10)$$

$$\overline{q_{\rm B}}/\nu = \int_0^t q_{\rm B}(t)dt / L = \left(k_q \int_0^t i(t)dt + c_q t\right) / L, \quad (11)$$

або, у випадку I = const:

(7)

$$Q_{\Sigma} = \overline{q_{\rm B}} t, \qquad (12)$$

$$q_{\rm\scriptscriptstyle B} \,/\, v \,=\, Q_{\Sigma} \,/\, L \,. \tag{13}$$

Слід відзначити, що визначення кількості тепловкладень у виріб за цифровим рядом зварювального струму у вигляді складної кусково-неперервної визначеної функції i(t), що є сукупністю дискретних значень $i_1(\tau_1), i_2(\tau_2), ...,$ $i_n(\tau_n)$, отриманого шляхом реєстрації з заданою частотою АЦП f = t/n, згідно з [1] є частковим випадком для залежності (11).

Запропонований алгоритм цифрової обробки режимів наплавлення для визначення кількості тепловкладень у виріб базується на розрахунках об'єктивного параметра процесу МПН — визначеного інтеграла сили зварювального струму t

 $\int i(t)dt$, що характеризує кількість електричного заряду, який пройшов через дуговий проміжок катод — анод за час горіння дуги. Геометричний сенс такого інтегралу [1] (див. рис. 2, в) — площа фігури, обмежена залежністю i(t), є інтуїтивно зрозумілим технологу через прямий вплив на кількість тепловкладень у виріб амплітуди зварювального струму та тривалості наплавлення.

Для зареєстрованого режиму МПН РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т, крім визначення погонної енергії (11), (13), також розраховувалися середні значення електричної та ефективної теплової потужності мікроплазмової дуги:

$$\overline{U \cdot I} = Q^{\mathrm{E}} / t ,$$
$$\overline{q_{\mathrm{B}}} = Q_{\Sigma} / t .$$

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

З метою формування уявлень про взаємозв'язок між кількістю тепловкладень у виріб при МПН, що відповідно характеризуються рядом зазначених вище показників та схильністю до утворення тріщин у зварному з'єднанні «основний наплавлений метал» при серійному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т зі сплаву ЖС32-ВИ з напрацюванням більш ніж 6...8 тис. год, було виконано такі технологічні дослідження. У виробничих умовах АТ «МОТОР СІЧ» з використанням присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ однієї партії (фракція +63...-160 мкм) виконувалось відновлювальне наплавлення торців бандажних полиць зазначених РЛ на чотирьох дослідних моторокомплектах з послідовним збільшенням діючого значення сили зварювального струму. Такі РЛ мали приблизно однакове напрацювання на двигуні Д-18Т, ідентичні геометричні розміри зони ремонту та, відповідно, наплавленого валика; всі інші технологічні параметри МПН не змінювалися. При цьому за викладеною вище методикою вибірково реєструвалися (≈ 10 % РЛ з 128 шт. моторокомплекту) та аналізувалися режими МПН. Після проведення повного циклу технологічних операцій РЛ проходили фінішний капілярний контроль ЛЮМ-1ОВ, який на деяких з них виявляв тріщини та несплавлення. Бракованими вважалися ті РЛ, на яких в зоні ремонту наплавленням було виявлено хоча б один з вказаних дефектів.

Використання викладених вище методик розрахункового визначення узагальнених енергетичних показників режиму МПН, що характеризують кількість тепловкладень у виріб за час його проведення, дозволило з прийнятною точністю і оперативністю проаналізувати нестаціонарні режими наплавлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т зі сплаву ЖС32-ВИ (рис. 2—4). Узагальнені результати такого аналізу та показники їхнього взаємозв'язоку з показниками зварюваності (відносна кількість та вид браку) наведено в табл. 2.

Встановлено, що у межах сукупності діапазонів даних енергетичних показників спостерігається лінійна залежність, ранжована віднос-

Номер							Показн	ики браку
моторо- комп- лекту	$\bar{I_{\mu}}$, A	<u>U·I</u> /ν, Дж∕мм	Q ^I , A∙c	$\overline{U\cdot I}$, Bt	$\overline{q_{\scriptscriptstyle \rm B}}$, Bt		частка кіль- кості лопаток у мотороком- плекті, %	види браку
1	7 0	240 2 442 2	520.2 687.6	115 / 150 7	05 / 125 5	250 2 241 2	27.2	HOOLHODHOUNG
1	19	540.5442.5	529.2007.0	113.4139.7	95.4125.5	239.2	27.5	несплавлення
2	1012	493.2587.1	763.2932.4	167.2199.0	140.6173.8	382.3469.2	3.1	тріщини
3	1214	595.2684.0	946.81101.6	201.8239.4	177.1208.5	477.7562.2	15.6	тріщини
4	1416	697.2799.1	1116.01288.8	236.4288.5	206.4235.6	562.2656.7	58.6	тріщини

Таблиця 2. Взаємозв'язок діапазонів енергетичних показників режимів МПН (див. позначення в тексті) з відносною кількістю браку у процесі ремонту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т зі сплаву ЖС32-ВИ з напрацюванням понад 6...8 тис. год



Рис. 3. Особливості розподілу об'єктивних енергетичних показників режимів наплавлення в залежності від умовного порядкового номеру відновленого моторокомплекту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т згідно з табл. 2: а усередненого діючого значення $\overline{I_{\pi}}$ сили зварювального струму; б — погонної енергії при формуванні 1 мм на-

плавленого валика $Q^E/L = \int_0^t i(t) \cdot U(t) dt / L$; *е* — питомої кількості заряду $Q^I = \int_0^t i(t) dt / L$, що пройшов крізь електричний проміжок катод — анод мікроплазмової дуги

Таблиия 3. Вміст кисню і азоту в наплавленому металі ЖС32 для різних партій відповідного присадного порошку, визначений за методикою відновного плавлення у потоці газу-носія

Номер партії	Кисень, ваг. %	Азот, ваг. %
1	0.009000.01450	0.003140.00362
2	0.010500.01340	0.004140.00506
3	0.005330.00618	0.001060.00121
4	0.028600.03760	0.004260.00623
5	0.005890.00694	0.001080.00123

но порядкового номеру моторокомплекту (див. табл. 2 та рис. 4). В середині кожного моторокомплекту відмічено менший розмах варіювання експериментальних даних, зумовлений, ймовірно, впливом ручного процесу (зварювальний струм, довжина дуги, поперечний переріз валика та швидкість наплавлення) або індивідуальними конструктивними особливостями поверхні під наплавлення (ширина бандажної полиці).

Таким чином, встановлено, що найбільша частка виходу якісних РЛ після МПН бандажних полиць забезпечується для моторокомплекту № 2 при середніх значеннях ефективної теплової потужності дуги $\overline{q_{\rm B}}$ = 140...175 Вт і погонної енергії наплавлення $\overline{q_{\rm B}}/\nu$ = 380...470 Дж/мм. В цих технологічних умовах спостерігалося як надійне сплавлення наплавленого металу з основним, так і мінімальна схильність аналізованого зварного з'єднання сплаву ЖС32-ВИ до утворення тріщин. При збільшенні середніх значень

 $q_{\rm B}$ і $q_{\rm B}/\nu$ у 1.36...1.47 раза порівняно з встановленим оптимальним діапазоном (моторокомплект № 2) у зварному з'єднанні «основний — наплавлений метал» сплаву ЖС32-ВИ відмічається значне підвищення схильності до утворення тріщин (див. табл. 2).

Отримані дані з взаємозв'язку узагальнених параметрів режиму МПН та статистики проявів схильності до утворення тріщин для даного типу РЛ надалі були використані при технологічному аналізі якості п'ять партій присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ, поставленого на АТ «Мотор Січ». Всі партії цього порошку мали однаковий гранулометричний склад (в межах фракції +63... -160 мкм) та за вмістом легуючих елементів відповідали вимогам ТУ 1-91-177-92 на відповідний НЖС. Проте при їхньому вхідному контролі в наплавленому металі ЖС32 для кожної партії присадного порошку було встановлено різний вміст кисню та азоту (табл. 3). На момент проведення дослідно-практичних робіт, висвітлених в даній роботі, гранично допустимий вміст [O] і [N] в нормативно-технічній документації на присадний порошок та наплавлений метал не регламентувався.

Відомо, що взаємодія основних у'-утворювальних елементів НЖС (Al, Ti, Nb, Ta, Hf), а

Д-18Т



також інших легуючих елементів (наприклад Cr, W) з киснем при зварюванні плавленням призводить до утворення тугоплавких оксидів [11, 19] через їхню високу спорідненість до цього хімічного елементу при високотемпературному нагріві [7]. У ряді робіт [11, 15] відмічається, що наявність таких тугоплавких оксидів у розплавленому металі і на поверхні зварювальної ванни вимагає підвищення тепловкладень у виріб для забезпечення при формуванні зварних з'єднань ЖНС прийнятного розтікання наплавленого металу та його змочуваності з основним.

Через пряму залежність між збільшенням кількості тепловкладень у виріб та підвищенням схильності до утворення тріщин при зварюванні плавленням НЖС та їхній наступній термічній обробці, як підтвердженій в даній роботі експериментально, так і відомої з ряду інших ро-



Рис. 4. Аналіз залежності величини середньої погонної енергії $Q^E/L = \int_0^t i(t) \cdot U(t) dt / L$ без врахування ефективного ККД нагрівання виробу (*a*), погонної енергії $Q_{\Sigma}/L = \int_0^t q_{\rm B}(t) dt / L$ з урахуванням ефективного ККД нагрівання виробу (*b*) та сумарної кількості заряду $Q^I = \int_0^t i(t) dt$, що пройшов крізь електричний проміжок мікроплазмової дуги у процесі наплавлення (*б*) в залежності від діючого значення зварювального струму $I_{\rm A}$ при МПН дослідних моторокомплектів РЛ ТВТ авіаційного двигуна

біт [16, 17, 20], актуально додаткове уточнення критеріїв технологічної придатності присадного порошку ЖС32 для умов малоамперної МПН при серійному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т, зокрема — з напрацюванням понад б... 8 тис. год. 3 огляду на попередньо встановлені факти припускалося, що в аналізованій області параметрів режимів МПН РЛ з важкозварюваного сплаву ЖС32-ВИ також є подібний зв'язок між вихідним вмістом кисню, азоту в присадному порошку ЖС32 (опосередковано характеризується вмістом цих домішок далі у наплавленому металі) та кількістю тепловкладень у виріб, необхідних для нормального формування валика наплавленого заданого поперечного перерізу.

Для встановлення ступеня придатності партії присадного порошку сплаву ЖС32-ВИ для відновлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т способом МПН у виробничих умовах запропоновано оцінювати її шляхом декількох контрольних лопаток-свідків. За викладеною в даній роботі методикою визначали теплову ефективну потужність мікроплазмової дуги та погонну енергію МПН з урахуванням ефективного ККД нагріву виробу. Надалі порівнювали визначені величини з попередньо встановленими «типовими» діапазонами параметрів МПН, зокрема з тим, у якому схильність до утворення тріщин при МПН РЛ зі сплаву ЖС32-ВИ проявляється мінімально (табл. 4).

Отримані результати дозволили зробити ряд висновків. Підвищення кількості тепловкладень у виріб при МПН РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більше 6...8 тис. год у 1.5 раза і більше порівняно з оптимальним діапазоном (див. табл. 2, режим 2) вже є критичним, оскільки супроводжується значним збільшенням випадків виявлення тріщин. Такі підвищені витрати тепла при формуванні валика заданого перерізу корелюють зі збільшенням в наплавленому металі ЖС32 вмісту кисню більше 0.010 ваг. % і азоту більше 0.004 ваг. %. В свою чергу це є наслідком застосування недостатньо якісного присадного порошку ЖС32 з середньоваговим вмістом кисню та азоту відповідно 0.0380 ваг. % і 0.0040 ваг. % (партія № 4). Оптимальні тепловкладення при МПН спостерігаються при застосуванні присадного порошку зі значно меншим вмістом кисню та азоту — відповідно 0.0055 ваг.% і 0.001 ваг. % (партія № 3).

Сучасний рівень розвитку робототехніки у зварювальному виробництві однозначно свідчить про економічні та технологічні переваги заміни ручних та автоматичних процесів. Але у виробничих умовах фактична реалізація переходу до роботизованих систем МПН у першу чергу обмежується недостатнім рівнем сформованих уявлень про необхідні технологічні вимоги до відповідних методик попереднього вибору режимів наплавлення. Отримані результати із взаємозв'язку узагальнених параметрів режиму наплавлення та схильності до утворення тріщин (див. табл. 2—4) були використані для роботизації процесу МПН РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т на установці STARWELD 190R.

Спочатку режим МПН для роботизованого наплавлення зазначених лопаток був підібраний, виходячи з необхідної форми і розмірів поперечного перерізу наплавленого валика і стабільного формування зварювальної ванни. Аналіз за викладеною в даній роботі методикою показав, що вихідний режим МПН відповідав діапазонам

ефективної потужності мікроплазмової дуги $\overline{q_{\rm B}}$ = 193...197 Вт та погонної енергії $\overline{q_{\rm B}}/\nu$ = 505... 511 Дж/мм, що відповідали умовам наплавлення моторокомплектів № 1-2 (див. табл. 4). Надалі була проведена додаткова корекція режиму шляхом зниження приблизно на 10 % величини зварювального струму та витрат присадного порошку ЖСЗ2. В результаті для нового режиму

	Присадний по- рошок		МПН РЛ-свідків		Во	становлені зако іьності до утвој			
№ партії	101				«типови	й» діапазон	рівень браку	для відновлення моторо-комплектів РЛ	
	[О], ваг.%	[IN], ваг. %	$[n], \qquad \overline{q_{\scriptscriptstyle B}}, B_{\rm T}$	$\overline{q_{\rm B}/\nu}$, Дж/мм	$\overline{q_{\scriptscriptstyle B}}, B_{\rm T}$	$\overline{q_{\scriptscriptstyle B}/\nu}$, Дж/мм	у відновленому моторокомплекті РЛ	з напрацюванням.	
1	_	_	183196	480520	177209	478562	15.6 %	до 68 тис. год	
2	_	_	191204	490538	177209	478562	15.6 %	до 68 тис. год	
3	0.0055	0.0010	145160	380410	141174	382469	3.1 %	більше 68 тис. год	
4	0.0380	0.0040	227249	640670	206236	562657	>58.6 %	забракувати	
5	-	_	149165	388423	141174	382469	3.1 %	більше 68 тис. год	

Таблиця 4. Особливості прогнозування схильності до утворення тріщин у процесі ремонту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т на основі типових діапазонів енергетичних показників режимів МПН при оцінці різних партій присадного порошку ЖС32

Примітка: * — прийняте технологічне рішення стосовно поставленої партії присадного порошку ЖС32.

<u>були</u> встановлені діапазони $\overline{q_{\rm B}}$ = 163...168 Вт та $q_{\rm B}/\nu$ = 409...417 Дж/мм, що практично відповідає кількості тепловкладень у виріб при МПН моторокомплектів № 3, 5 (див. табл. 4).

При скоригованих режимах на роботизованій установці STARWELD 190R був наплавлений моторокомплект РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням понад 6...8 тис. год. Після проходження повного циклу механічної і термічної обробки відновленого способом МПН моторокомплекту на заключній операції капілярного контролю ЛЮМ 1-ОВ тріщин в зоні ремонту РЛ не виявлено. Таким чином, обраний за описаною в даній роботі методикою режим роботизованого наплавлення забезпечив максимальний вихід якісних лопаток в даному моторокомплекті.

Опробування роботизованого наплавлення дослідного моторокомплекту РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більш ніж 6...8 тис. год показало такий технологічний ефект порівняно з ручним процесом МПН: підвищення стабільності якості ремонту при автоматичному відтворенні оптимальних параметрів наплавлення; зниження вимог до кваліфікації зварювальникаоператора; зменшення витрат часу на наплавлення моторокомплекту орієнтовно у 2...2.5 раза.

Аналіз результатів дослідної роботи показав, що запропонований новий технологічний підхід для певної типової конфігурації відновлюваної поверхні РЛ з НЖС ЖС32-ВИ забезпечує можливість на основі аналізу відносно невеликої вибірки режимів МПН (≈50 шт.) об'єктивно встановити границі оптимального діапазону енергетичних показників процесу. Його нижня межа визначається такою кількістю питомих тепловкладень у виріб, при яких гарантовано забезпечується якісне формування наплавленого металу, це у першу чергу є відсутність несплавлень. Верхня межа є такою кількістю питомих тепловкладень у виріб, при яких гарантовано забезпечується відсутність або мінімальна схильність зони ремонту до утворення тріщин як у процесі наплавлення, так і при наступних термічних обробках.

Результати промислового опробування викладеного в даній роботі технологічного підходу показали, що отримані дані з оптимальних діапазонів енергетичних параметрів процесу МПН сплаву ЖС32-ВИ можуть бути основою для створення і подальшої оптимізації відповідних програм для наплавлення РЛ на роботизованому обладнанні. Також даний підхід в найближчій перспективі сприятиме створенню в умовах серійного ремонтного виробництва універсальних баз даних з діапазонів енергетичних параметрів процесу, що дозволяють гарантувати якість зварного з'єднання «основний — наплавлений метал» важкозварюваних НЖС і мінімальний рівень виробничого браку відновлених деталей авіаційних ГТД з таких матеріалів. Це надасть можливість для деталей зі складною геометрією зони ремонту швидко і з мінімальними витратами ресурсів здійснювати розробку, впровадження та корекцію технології МПН в умовах варіювання ряду технологічних факторів виробництва, а саме: розміри і форма деталі; тривалість її попередньої експлуатації; якість дисперсної присадки; відмінні моделі плазмотронів, спеціалізованих джерел живлення і пристроїв для подавання присадного порошку.

Викладений матеріал також підтверджує принципову можливість створення для серійного наплавлення РЛ авіаційних ГТД спеціалізованих програм контролю і прогнозування якості в онлайн-режимі, заснованих на автоматичній обробці зареєстрованих даних дискретного «потоку» режимів МПН.

висновки

1. Для оптимізації якості ремонту і трудовитрат при серійному відновленні бандажних полиць РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з обмежено зварюваного НЖС ЖС32-ВИ у виробничих умовах АТ «МОТОР СІЧ» опробувано розроблений в ІЕЗ ім. Є. О. Патона новий технологічний підхід. Він ґрунтується на визначенні кількості тепловкладень у виріб при використанні системи реєстрації і аналізу зварювального струму та встановленні співвідношень між ними і кількісними показниками схильності до утворення тріщин у зварному з'єднанні «основний — наплавлений метал» важкозварюваного НЖС типової відновленої деталі авіаційного ГТД.

2. Для аналізу і контролю режимів МПН із застосуванням присадного порошку ЖС32 при

відновленні кромок бандажних полиць РЛ використано наступні експериментальні та розрахункові енергетичні критерії: визначений інтеграл зварювального струму (за часом); ефективна теплова потужність дуги та погонна енергія наплавлення з використанням ефективного ККД нагріву виробу.

3. На основі статистичної обробки режимів наплавлення РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більше 6...8 тис. год і співвідношення їх з даними про схильність до утворення тріщин в зоні ремонту встановлено оптимальний діапазон енергетичних параметрів МПН, де вихід якісних РЛ перевищує 97 % від загальної вхідної їхньої кількості: ефективна теплова потужність мікроплазмової дуги — 140...175 Вт, погонна енергія наплавлення — 380...470 Дж/мм.

4. Встановлено, що підвищення середньовагового газовмісту кисню і азоту у присадному порошку ЖС32 у межах [O] = 0.0055... 0.0380 ваг. % та [N] = 0.001...0.004 ваг. % викликає необхідність збільшення кількості тепловкладень у виріб у процесі МПН орієнтовно у 1.5 раза порівняно із оптимальним діапазоном параметрів, що суттєво знижує опірність до утворення тріщин при відновлювальному ремонті РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з напрацюванням більше 6...8 тис. год.

5. Результати проведених дослідно-практичних робіт показали доцільність здійснення вхідного контролю середньовагового вмісту кисню та азоту у присадному порошку ЖС32, а також його довиробничого тестування, що передбачає оцінку енергетичного «відгуку» такої дисперсної присадки при формуванні наплавленого валика і аналогічний контроль цих домішок у наплавленому металі.

6. Отримані дані дозволили в умовах виробництва АТ «МОТОР СІЧ» для РЛ ТВТ авіаційного ГТД Д-18Т з різним терміном напрацювання оптимізувати технологію МПН за критеріями якості дисперсної присадки ЖС32 і відповідності режимів наплавлення декількох лопатоксвідків встановленому оптимальному діапазону. Це дозволило уникнути масового браку при відновлювальному ремонті зазначених лопаток з напрацюванням більше 6...8 тис. год ручним МПН, а також підібрати режими відповідного роботизованого МПН без утворення тріщин в зоні ремонту.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. *Справочник по математике* (Для инженеров и учащихся BTУ3ов, 11-е изд.). Москва: Наука, 1967. 608 с.
- 2. Гладкий П. В., Переплетчиков Е. Ф., Рябцев И. А. Плазменная наплавка. Київ: Екотехнологія, 2007. 292 с.
- 3. Демьянцевич В. П., Михайлов Н. П. Составляющие теплового баланса микроплазменной дуги. *Автомат. сварка*. 1973. № 8. С. 25–27.
- 4. Жеманюк П. Д., Петрик И. А., Чигилейчик С. Л. Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Автомат. сварка*. 2015. № 8. С. 43–46.
- 5. Лесников В. П., Кузнецов В. П., Мороз Е. В., Пейчев Г. И., Замковой В. Е., Андрейченко Н. В. Стабильность сплава ЖС32-ВИ после высокотемпературных выдержек и эксплуатации на двигателе Д-18Т. *Газотурбинные технологии*. 2007. № 8 (октябрь). С. 40–42.
- 6. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. и др. Микроплазменная сварка. Киев: Наук. думка, 1979. 248 с.
- 7. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. Москва: Высш. шк., 1967. 508 с.
- 8. Рыкалин Н. Н. Расчеты тепловых процессов при сварке. Москва: Машгиз, 1951. 296 с.
- 9. Симс Ч., Столлов Н., Хагель В. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных енергоустановок. Пер. с англ. Под ред. Р. Е. Шалина. Москва: Металлургия, 1995. 384 с.
- 10. Сорокин Л. И. Напряжения и трещины при сварке и термической обработке жаропрочных никелевых сплавов. *Сварочное пр-во.* 1999. № 12. С. 11–17.
- 11. Сорокин Л. И. Заварка трещин с окисленной поверхностью на жаропрочных никелевых сплавах. *Сварочное пр-во.* 2004. № 12. С. 30—31.
- 12. Технологический семинар Deloro Stellite в Запорожье. Автомат. сварка. 2010. № 1. С. 59-62.

- 13. Цинке М., Нойберт Г., Герольд Х. Свойства сварных соединений жаропрочных сплавов на основе никеля. *Авто-мат. сварка*. 1999. № 4. С. 35—38.
- 14. Ющенко К. А., Савченко В. С., Яровицын А. В., Наконечный А. А., Настенко Г. Ф., Замковой В. Е., Белозерцев О. С., Андрейченко Н. В. Разработка технологии восстановления торцов бандажных полок рабочих лопаток ТВД авиационного двигателя Д18Т методом микроплазменной порошковой наплавки. *Автомат. сварка*. 2010. № 8. С. 25–29.
- 15. Ющенко К. А., Яровицын А. В. Влияние содержания активных газов и сплошности дисперсной присадки на процесс формирования валика при микроплазменной порошковой наплавке никелевых жаропрочных сплавов. *Автомат. сварка.* 2014. № 6-7. С. 119—128.
- 16. Ющенко К. А., Яровицын А. В., Червяков Н. О. Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32. *Автомат. сварка*. 2017. № 2. С. 3–7.
- 17. Яровицин О. В. *Мікроплазмове порошкове наплавлення жароміцних нікелевих сплавів з вмістом γ'-фази 45—65 %:* автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2009. 21 с.
- 18. Яровицын А. В. Энергетический подход при анализе режимов микроплазменной порошковой наплавки. *Авто-мат. сварка*. 2015. № 5-6. С. 18—25.
- Яровицын А. В., Новиков С. В. Методическое обеспечение погружного калориметрирования малоамперных дуг. 36. тез. до V Всеукраїнської науково-техн. конф. молодих вчених та спеціалістів «Зварювання та суміжні технології» (ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 27—29 травня 2009 р.). Київ: ІЕЗ ім. Є. О. Патона, 2009. С. 124.
- 20. Lippold J. C., Kiser S. D., DuPont J. N. *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*. Hoboken, New Jersey: John Willey&Sons, Inc., 2009. 456 p.

REFERENCES

- 1. Bronstein I. N., Semendiajev K. A. (1967). *Mathematics handbook* [For engineers and technical university students, 11th publ.]. Moscow: Science, 608 p.
- 2. Gladkiy P. V., Perepletchikov E. F., Ryabtsev I. A. (2007). Plasma cladding. Kiyv: Ecotechnology, 292 p.
- 3. Demjantsevich V. P., Mykhailov N. P. (1973). Micro-plasma arc heat balance components. *Autom. welding*, № 8, 25–27.
- 4. Zhemanyuk P. D., Petrik I. A., Chygileichyk S. L. (2015). Experience of introduction of the technology of reconditioning microplasma powder surfacing at repair of high-pressure turbine blades in batch production. *Autom. welding*, № 8, 43–46.
- 5. Lesnikov V. P., Kuznetsov V. P., Moroz E. V., Peychev G. I., Zamkovoy V. E., Andreychenko N. V. (2007). JS32-VI superalloy stability after high temperature exposure and operating in D-18T engine. *Gas turbine technologies*, № 8, 40–42.
- 6. Paton B. E., Gvozdetsky V. S., Dudko D. A., et al. (1979). Micro-plasma welding. Kyiv: Scientific thought, 248 p.
- 7. Petrov G. L., Tumarev A. S. (1967). *Theory of Welding Processes* [with basics of Physical chemistry]. Moscow: Highest School, 508 p.
- 8. Rykalin N. N. (1951). Welding heat processes' calculations. Moscow: Mashgiz, 296 p.
- 9. Sims Ch., Stoloff N., Hagel V. (1995). *Superalloys II. High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power*. Ed. by R. E. Shalin. Moscow: Metallurgy, 384 p.
- 10. Sorokyn L. I. (1999). Stress and cracks during welding and thermal processing of nickel superalloys. *Welding. production*, № 12, 11–17.
- 11. Sorokin L. I. (2004). Welding cracks with oxidized surface on nickel superalloys. Welding production, № 12, 30–31.
- 12. Deloro Stellite technological seminar in Zaporizhzhia (2010). Autom.welding, № 1, 59-62.
- 13. Zinke M., Noibert G., Gerold H. (1999). Properties of nickel-based superalloy weldments. Autom. welding, № 4, 35–38.
- 14. Yushchenko K. A., Savchenko V. S., Yarovytsyn A. V., Nakonechny A. A., Nastenko G. F., Zamkovoj V. E., Belozertsev O. S., Andrejchenko N. V. (2010). Development of the technology for repair microplasma powder cladding of flange platform faces of aircraft engine high-pressure turbine blades. *Autom. welding*, № 8, 25–29.
- 15. Yushchenko K. A., Yarovytsyn A. V. (2014). Influence of active gas content and disperse filler continuity on the process of bead formation in microplasma powder surfacing of nickel superalloys. *Autom. welding*, № 6-7, 119–128.
- 16. Yushchenko K. A., Yarovytsyn A. V., Chervyakov N. O. (2017). Effect of energy parameters of microplasma powder surfacing modes on susceptibility of nickel alloy ZhS32 to crack formation. *Autom. welding*, № 2, 3–7.
- 17. Yarovytsyn O. V. (2009). *Micro-plasma powder cladding of nickel superalloys with 45–65 % γ'-phase content*. Ph.D thesis abstract. Kiyv: E. O. Paton Electric Welding Institute, 21 p.
- 18. Yarovytsyn A. V. (2015). Energy approach in analysis of microplasma powder surfacing modes. *Autom. welding,* № 5-6, 18–25.

- Yarovytsyn A. V., Novykov S. V. (2009). *Methodological support of submerged calorimetry of low-ampere arcs*. Digest of theses for V Ukrainian scien.-techn. conference of young scientists and specialists "Welding and related technologies" (E. O. Paton EWI, 27–29 may, 2009). Kyiv: E. O. Paton EWI, 124.
- Lippold J. C., Kiser S. D., DuPont J. N. (2009). Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys. Hoboken, New Jersey, John Willey&Sons, Inc., 456 p.

Стаття надійшла до редакції	13.01.2022
Після доопрацювання	18.04.2022
Прийнято до друку	19.04.2022

Received 13.01.2022 Revised 18.04.2022 Accepted 19.04.2022

*K. A. Yushchenko*¹, Member of National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. in Tech., Professor ORCID 0000-0002-6276-7843 *O. V. Yarovytsyn*¹, Senior Researcher, Ph.D. in Tech. ORCID 0000-0001-9922-3877 E-mail: yarovytsyn@ukr.net

*G. D. Khrushchov*¹, Junior Researcher ORCID 0000-0002-4045-3587 *I. A. Petrik*², Chief Welder, Ph. D. in Tech. ORCID-0000-0001-6600-1661 *S. L. Chygileichyk*², Head of Welding Bureau ORCID 0000-0002-2372-9078

¹ E. O. Paton Electric Welding Institute NAS of Ukraine
 ¹ K. Malevicha Str., Kyiv, 03150 Ukraine
 ² Motor Sich JSC
 ² Motor Sich JSC

15, Motorostroiteley Avenue, Zaporozhye, 69068 Ukraine

RESEARCH AND OPTIMIZATION OF REFURBISHMENT OF HPT BLADES OF THE D-18T AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINE BY MICRO-PLASMA POWDER WELDING

In current work, peculiarities of the micro-plasma powder welding deposition process applied to the batch refurbishment of D-18T aircraft engine HPT blades made of ZhS32-VI nickel superalloy with limited weldability have been studied. It has been demonstrated that extending operating resource over 6-8 thousand hours leads to an increase in ZhS32-VI "base-deposited metal" weld's cracking susceptibility during welding and subsequent thermal processing operations.

It has been shown that providing stable forming of deposited bead on the shroud edge's surface requires applying nonstationary impulse modes of straight polarity welding current. Considering the significant amount of technological parameters of the process studied, subjective analysis of such welding modes is extremely complicated. We have introduced the method of specifying requirements for such single-layer micro-plasma powder welding deposition modes with welding current in a range of 7-20 A according to the criteria of effective arc heating power and heat input, which involves using the system for registration and digital processing of welding current-welding bead deposition time dependency. Based on the analysis of statistical data on the quantitative evaluation of cracking susceptibility of the investigated weld, the optimal range of average values has been discovered for these generalized welding deposition mode parameters to be applied in a manual or automated process, which provides no more than several percent of cracked blades detected at the end of refurbishment technological cycle.

We have shown that significant technological parameters, which affect the amount of technological defects during mentioned blades' refurbishment, are the average value of effective welding current and ZhS32 superalloy powder quality, primarily determined by oxygen and nitrogen average weight content in its dispersed particles. It was also shown that the increase in average weight content of gas impurities in the filler powder, primarily oxygen, causes a significant increase in energy consumed on deposited bead formation during the micro-plasma powder deposition process. An initial quality control method for the ZhS32-VI filler powder range has been proposed. The method is based on the average weight content of oxygen and nitrogen, evaluated by reducing fusion in transporting gas flow and on evaluation criteria of effective arc heating power and heat input average values of witness sample blades' refurbishment process and their conformity to previously defined optimal.

An evaluation of future application possibilities for registration systems and deposition mode analysis in batch repair conditions of nickel superalloy aircraft parts has been introduced.

Keywords: micro-plasma powder welding deposition, HPT turbine batch repair, ZhS32-VI nickel superalloy, cracking susceptibility, filler powder, deposited metal, oxygen and nitrogen content, welding deposition mode registration and analysis system, effective arc heating power, heat input.

Дослідження Землі з космосу

Study of the Earth from Space

https://doi.org/10.15407/knit2022.03.017 УДК 528.8: 004.9

К. Г. БІЛОУСОВ¹, Голов. конструктор, нач. проєктно-конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів М. В. НЕЧИПОРУК², ректор, д-р техн. наук, проф. В. С. ХОРОШИЛОВ¹, пров. наук. співроб, д-р техн. наук, проф., «Заслужений діяч науки і техніки України» Д. М. СВИНАРЕНКО³, проректор з науково-педагогічної роботи, канд. техн. наук, проф. Д. К. МОЗГОВИЙ³, доцент, канд. техн. наук Е-mail: m-d-k@i.ua В. М. ПОПЕЛЬ¹, заст. нач. відділу Е-mail: info@yuzhnoye.com ¹Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008 ² Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут» вул. Чкалова 17, Харків, Україна, 61000 ³Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара Проспект Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49000

МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОЇ КОРЕКЦІЇ ПРИЛАДОВИХ СПОТВОРЕНЬ НА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКАХ «ЛАНДСАТ-7»

Запропоновано альтернативний метод автоматизованої корекції приладових спотворень сканера ЕТМ+ на багатоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7». Метод основано на використанні фільтрації в області просторових частот із застосуванням швидкого перетворення Фур'є та спектральних масок. Параметри маски визначаються за відомим просторовим періодом завади або експериментально за результатами фільтрації. Для виконання фільтрації на області просторових частот, що підлягають видаленню, накладається фільтрувальна маска, що складається із пікселів з нульовими значеннями. У відфільтрованому зображенні будуть вилучені періодичні компоненти, просторовий період яких відповідає відфільтрованим на фур'є-образі просторовим частотам. Якість фільтрації визначається використовуваною маскою. У випадку використання багатоспектральних знімків маска фільтра, побудована за фур'є-образом одного зі спектральних каналів, використовується для фільтрації інших каналів. Результати візуального аналізу оброблених знімків показали досить якісну корекцію та усунення приладових спотворень сканера ЕТМ+ у порівнянні з іншими методами. Основні переваги запропонованого методу: можливість роботи без використання метаданих та масок приладових спотворень; робота з одноканальними і багатоспектральними знімками; можливість роботи з невеликими фрагментами сцени; мінімальна кількість ручних налаштувань для процедур обробки; можливість роботи без додаткових знімків за інші дати; висока стійкість використовуваних алгоритмів при використанні знімків з різних супутників; досить добра повторюваність результатів на супутникових знімках, зроблених у різні сезони та для різних територій. Експериментальне тестування запропонованого методу на великій кількості знімків також підтвердило добру повторюваність і високу стійкість використовуваних алгоритмів. Розроблену технологію можна також успішно використовувати для корекції приладових просторово-періодичних спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів.

Ключові слова: супутник «Ландсат-7», сканер ETM+, багатоспектральні знімки, приладові спотворення, швидке перетворення Фур'є, спектральні маски.

Цитування: Білоусов К. Г., Нечипорук М. В., Хорошилов В. С., Свинаренко Д. М., Мозговий Д. К., Попель В. М. Метод автоматизованої корекції приладових спотворень на багатоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7». *Космічна наука і технологія.* 2022. **28**, № 3 (136). С. 17–28. https://doi.org/10.15407/knit2022.03.017

вступ

В останні роки супутникова зйомка стала найбільш масовим і доступним джерелом просторових даних у багатьох сферах людської діяльності завдяки своїм численним перевагам у порівнянні з наземними методами спостережень [4, 12, 19].

До таких переваг належать:

 максимальна об'єктивність і вірогідність (супутникові знімки дозволяють повністю виключити помилки людей, а також навмисне перекручування або замовчування важливої інформації);

• широка оглядовість і висока інформативність (можливе спостереження будь-якої, навіть важкодоступної території на Землі з охопленням у тисячі кілометрів); • максимальна актуальність і висока оперативність (можливість доставки даних користувачам без затримки — безпосередній прийом на абонентські станції);

• висока періодичність зйомки (до декількох знімків на добу);

• багатодисциплінарність (використання тих самих знімків при рішенні широкого спектру наукових і прикладних завдань в інтересах різних державних структур і приватних компаній);

• багатоспектральний характер спостережень (зйомка в декількох спектральних каналах у видимому та IЧ-діапазонах);

• абсолютна безпека (відсутність ризиків для здоров'я і життя людей у порівнянні з наземними методами);

• висока економічна ефективність (істотно менші витрати порівняно з наземними методами);

Таблиця 1. Основні технічні характеристики супутника «Ландсат-7»

Значення				
15 квітня 1999 р. / авіабаза Ванденберг (США)				
Lockheed Martin / NASA, NOAA, USGS (CIIIA)				
2200 кг / 7 років				
Сонячно-синхронна / 705 км / 98.2°				
99 хв / 10:00 — 10:15 (низхід. вузол)				
40.6 см / 243.8 см				
185 км / 16 діб				
SSD / 378 Гбіт				

Таблиця 2. Основні технічні характеристики оптико-механічного сканера ЕТМ+

Канал	Спектральний діапазон	Довжина хвилі, мкм	Тип / кількість детекторів	Мінімальне відношення сигнал / шум	Просторове розрізнення, м
B1 (VNIR)	Видимий (синій)	0.450.52	SiPD / 16	32	30
B2 (VNIR)	Видимий (зелений)	0.530.61	SiPD / 16	35	30
B3 (VNIR)	Видимий (червоний)	0.630.69	SiPD / 16	26	30
B4 (VNIR)	Ближній інфрачер- воний	0.780.90	SiPD / 16	32	30
B5 (SWIR)	Короткохвильовий інфрачервоний	1.551.75	InSb /16	25	30
B6 (TIR)	Тепловий інфрачер- воний	10.412.5	HgCdTe / 8	н.д.	60
B7 (SWIR)	Короткохвильовий інфрачервоний	2.092.35	InSb /16	17	30
B8 (PAN)	Панхроматичний	0.520.90	SiPD / 32	15	15



Рис. 1. Знімок із супутника «Ландсат-7» за 28 березня 2020 р. (а — повна сцена, б — збільшений фрагмент)

• максимальна доступність (простота одержання даних і відсутність юридичних або політичних бар'єрів);

• висока конфіденційність (таємність зйомки і мінімізація ризиків витоку інформації).

Додатковою істотною перевагою використання даних ДЗЗ є відкритий і безкоштовний доступ до багатоспектральних і радарних супутникових знімків середнього просторового розрізнення «Ландсат-7», «Ландсат-8», «Sentinel-1A/B», «Sentinel-2A/B» та ін. Це сприяло широкому використанню цих знімків для вирішення широкого кола науково-прикладних задач [1, 11, 14].

ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Для оцінки антропогенних і природних змін земного покриву досить часто використовуються архівні супутникові знімки, отримані за допомогою оптико-механічних сканерів [7, 13, 20]. Відмінною рисою таких знімків є різні приладові геометричні та радіометричні завади та спотворення. Одним з видів приладових спотворень є радіометричні завади із просторово-періодичною структурою. Ці спотворення можуть бути викликані різними факторами, серед яких можна виділити такі: • технічні збої в системах формування, обробки і передачі даних (супутники «Ландсат-3», «Ландсат-5»);

• значний розкид значень чутливості та нелінійності фотоелементів давача (супутник «Океан-О»);

• різні значення коефіцієнтів підсилення і динамічного діапазону елементів підсилювального тракту (супутник «Січ-1»);

• несправності механічних елементів бортового багатоспектрального оптико-механічного сканера (супутник «Ландсат-7»).

З перерахованих вище супутників на теперішній час на орбіті функціонує тільки американський супутник ДЗЗ середнього просторового розрізнення «Ландсат-7» [23, 24, 30], запущений в 1999 р. (табл. 1). Бортовим знімальним приладом на цьому супутнику є багатоспектральний оптико-механічний сканер ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) (табл. 2).

31 травня 2003 р. на цьому супутнику відмовив коректор смуги охвату видошукача SLC (Scan Line Corrector) — один із ключових елементів основної системи формування зображення ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Внаслідок цієї поломки майже на всій площі знім-



Рис. 2. Фрагменти знімка із супутника «Ландсат-7» за 20 березня 2020 р. (а — центр сцени, б — край сцени)

ка в усіх спектральних каналах, крім теплового, з'явилися характерні похилі чорні смуги, що розширюються до краю сцени (рис. 1). Неспотвореною залишається тільки вузька частина зображення у центрі сцени (рис. 2).

можливі шляхи рішення

Сучасні програмні пакети обробки супутникових знімків мають широкий набір інструментів для усунення різних видів спотворень та завад різного походження. Однак використання стандартних конволюційних і морфологічних фільтрів для усунення завад із просторово-періодичною структурою на геоприв'язаних зображеннях є малоефективним. Рангові, мажоритарні і медіанні фільтри не забезпечують достатнього усунення завад. Низькочастотні фільтри зменшують просторове розрізнення знімка, а напрямлені фільтри вносять значні нелінійні радіометричні спотворення.

Найбільш ефективні алгоритми усунення приладових завад працюють тільки з ненормалізованими зображеннями, які зберігають вихідну рядкову структуру (тобто не підданими ресемплінгу при геометричній корекції та географічній прив'язці). Однак багатоспектральні знімки середнього просторового розрізнення зі супутника «Ландсат-7» поставляються користувачам тільки в нормалізованому виді (тобто підданими ресемплінгу).

Для корекції приладових спотворень на знімках зі супутника «Ландсат-7» було розроблено багато методів і алгоритмів [16—18, 22, 25, 26, 29, 31], які були програмно реалізовані на різних мовах програмування (C++, Python, IDL та ін.). Ці алгоритми були включені у популярні програми обробки супутникових знімків (ERDAS, ENVI та ін.), а також у ГІС-пакети (ArcGIS, QGIS та ін.). Однак всі ці алгоритми мали істотні недоліки:

• необхідність використання готових масок приладових спотворень;

 робота тільки із цілою сценою (великий час обробки);

• велика кількість ручних настроювань для процедур обробки;

• використання додаткових знімків по цій же території за інші найближчі дати, що не завжди можливо через наявність на них хмарності або снігового покриву (рис. 3).

Крім того, заміна відсутніх ділянок однієї сцени непошкодженими ділянками з інших сцен



Рис. 3. Знімки із супутника «Ландсат-7», отримані у період грудень 2019 р. — березень 2020 р. (тільки одна сцена без хмарності й снігового покриву)

неприпустима для наземних об'єктів, яки мають високу динаміку змін у часі (рослинність, водойми, сніговий і льодовий покрив та ін.).

Перераховані вище недоліки наявних методів не дозволяють або істотно обмежують їхнє використання у сучасних веб-сервісах онлайн-обробки супутникових знімків.

ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основним завданням проведених досліджень є розробка та експериментальне тестування методів і алгоритмів усунення завад із просторово-періодичною структурою на супутникових знімках.

Основні вимоги до розроблюваних методів і алгоритмів:

• можливість роботи без використання метаданих та масок приладових спотворень;

• робота з одноканальними та багатоспектральними знімками;

• можливість роботи з невеликими фрагментами сцени, що особливо актуально для онлайнсервісів обробки та візуалізації даних ДЗЗ;

• мінімальна кількість ручних настроювань для процедур обробки;

• можливість роботи без додаткових знімків за інші дати;

• висока стійкість алгоритмів при використанні знімків з різних супутників;

• добра повторюваність на супутникових знімках, зроблених у різні сезони і для різних територій;

• можливість використання розроблених методів для корекції приладових просторово-періодичних спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів.

ЗАПРОПОНОВАНІ МЕТОДИ

Для здійснення ефективної фільтрації просторово-періодичних приладових завад оптико-механічного сканера ЕТМ+ в області просторових частот використано дискретне двовимірне перетворення Фур'є [9]:

1) виконується перехід від просторового подання f(x, y) до просторово-частотного F(u, v)шляхом прямого двовимірного дискретного перетворення Фур'є:

$$F(u,v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x,y) \exp(-i 2\pi u x / M - i 2\pi v y / N)],$$

де M і N — кількість пікселів вихідного зображення по горизонталі та вертикалі відповідно, i — уявна одиниця, u, v — змінні просторових частот;

2) виконується фільтрація (видалення періодичної завади) у частотній області шляхом множення вихідного спектра F(u, v) на передатну функцію фільтра $H(u, v)_{\phi iльтр}$ (маску з нульовими значеннями в області просторових частот перешкоди u_{3aB} , v_{3aB} і одиничними в іншій області просторових частот):

 $F(u, v)_{\oplus i \square b \square b} = F(u, v) * H(u, v)_{\oplus i \square b \square b};$

3) виконується зворотне двовимірне дискретне перетворення Фур'є для повернення від просторово-частотного подання $F(u, v)_{\phi iльтp}$ до просторового $f(x,y)_{\phi iльтp}$:

$$f(x, y) = (MN)^{-1} \times \\ \times \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} [F(u, v) \exp(i2\pi ux / M + i2\pi vy / N)],$$

де $x = \{1 ... N\}; y = \{1 ... M\}$ — піксельні координати елементів вихідного цифрового зображення по горизонталі та вертикалі відповідно. Параметри маски $H(u, v)_{\phi iльтр}$ визначаються за відомим просторовим періодом завади або експериментально за результатами фільтрації [28].

Для прискорення розрахунків використовується алгоритм швидкого дискретного перетворення Φ ур'є, який при *N* відліках зменшує кількість пар операцій множення/ділення з $2N^2$ до $N \log_2 N$. Перед його використанням піксельний розмір зображення приводиться до квадрата з піксельним розміром $2^n \times 2^n$ шляхом виділення частини зображення або доповнення пікселами з нульовими значеннями. Змінні просторових частот и, v приймають як позитивні, так і негативні значення, які розташовуються на образі Фур'є симетрично відносно початку координат, що вимагає відповідної симетрії при накладенні маски [10]. За потреби паралельно з фільтрацією просторово-періодичних завад можна виконати низькочастотну або високочастотну фільтрацію шляхом додавання відповідних масок.

У відфільтрованому зображенні будуть вилучені періодичні компоненти, просторовий період яких відповідає відфільтрованим на фур'єобразі просторовим частотам. Якість фільтрації визначається використовуваною маскою [8].



Рис. 4. Фрагмент знімка із супутника «Ландсат-7» за 12 березня 2020 р. розміром 512×512 пкл (а) і його фур'є-образ (б)

У випадку використання багатоспектральних знімків маска фільтра, побудована за фур'єобразом одного зі спектральних каналів, використовується для фільтрації інших каналів.

ВХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як вхідні дані використовувались фрагменти безхмарних ділянок, вирізаних з багатоспектральних знімків різних територій земної поверхні, отриманих зі супутника «Ландсат-7» за період з 2003 по 2020 рр. Для досліджень було використано спектральні канали видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів, а також панхроматичний канал. Ділянки обиралися поряд з непошкодженими частинами сцени.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 1 наведено результати обробки знімка із супутника «Ландсат-7» за 28 березня 2020 р. Оскільки знімок мав ділянки, покриті хмарністю, то для тестування було обрано кілька фрагментів розміром 512 × 512 пкл з різних місць сцени. Одну з обраних ділянок показано на рис. 5 (ліворуч).

Отриманий у результаті двовимірного прямого перетворення фур'є-образ F(u,v) для відображення в режимі 256 градацій сірого піддається нормалізації (амплітудному масштабуванню) [6].

Нормалізований образ $F(u, v)_{\text{норм}}$ (рис. 4, δ) відображає щільність розподілу просторових частот в оброблюваному масиві.

Результати фільтрації при використанні різних масок наведено на рис. 5. Як видно, при фільтрації з використанням швидкого двовимірного дискретного перетворення Фур'є усунення завад також зв'язано зі зниженням просторового розрізнення та радіометричними спотвореннями, але в істотно меншому ступені, ніж при використанні конволюційних фільтрів [27].

Кращу фільтрацію завад при мінімальних артефактах забезпечила клиноподібна маска (рис. 5, в). Для корекції радіометричних спотворень, внесених безпосередньо дискретним перетворенням Фур'є, виконується операція вирівнювання гістограми з використанням вихідного знімка як еталону [5].



Рис. 5. Результати фільтрації обраного фрагмента знімка (ліворуч) і використані для фільтрації маски (праворуч)

Результати обробки багатоспектральних знімків зі супутника «Ландсат-7» для інших територій і дат зйомки також підтвердили досить високу ефективність запропонованого методу фільтрації порівняно із традиційними.

Основне обмеження при застосуванні запропонованого методу таке ж, як і для інших методів фільтрації завад, які використовують методи інтерполяції. Воно полягає в суттєвому зростанні похибки інтерполяції при збільшенні інтервалу пропуску даних. Тому запропонований метод є найбільш ефективним для фільтрації завад на ділянках, які розташовані поблизу центральної частини сцени і які мають незначні пошкодження.



Рис. 6. Приклад використання знімків супутника «Ландсат-7» для оцінювання наслідків масових вирубувань диких лісів на території Карпат

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Область практичного застосування запропонованої методики досить велика, оскільки архівні багатоспектральні супутникові знімки, отримані зі сканера ЕТМ+ супутника «Ландсат-7», дуже широко використовуються для оцінки антропогенних і природних змін земного покриву [15, 21]. Зокрема, слід зазначити важливий та вкрай актуальний для України напрямок використання відкритих архівних даних ДЗЗ для оцінювання наслідків масових вирубувань диких лісів на території Карпат (рис. 6).

Додатковою перевагою запропонованої методики є те, що розроблена технологія також з успіхом може використовуватися для корекції приладових просторово-періодичних спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів.

ВИКОРИСТАННЯ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ

Матеріали досліджень було використано при підготовці лекційних і лабораторних занять,

включених до складу учбово-методичного комплексу «Обробка архівних багатоспектральних супутникових знімків зі сканера ЕТМ+ супутника «Ландсат-7», що викладається студентам старших курсів Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара в рамках навчальної дисципліни «Системи ДЗЗ», а також використовується при написанні курсових і дипломних робіт. У ході лабораторних робіт студентами ведеться експериментальне відпрацьовування і тестування запропонованої методики з використанням архівних знімків різних ділянок Землі, отриманих зі супутника «Ландсат-7».

НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Одним з перспективних напрямків подальших досліджень є удосконалення даної методики з метою зменшення обчислювальних витрат під час обробки супутникових знімків.

Це можливо реалізувати шляхом заміни швидкого двовимірного дискретного перетворення Фур'є на швидке двовимірне дискретне перетворення Хартлі [2, 3]. Завдяки цьому можливе суттєве зниження вимог до обсягу необхідної оперативної пам'яті комп'ютера, значне підвищення оперативності обробки супутникових знімків, а також деяке спрощення процедури побудови масок фільтрів.

ВИСНОВКИ

Запропоновано альтернативний метод корекції приладових спотворень сканера ЕТМ+ на багатоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7» з використанням швидкого перетворення Фур'є. Основні переваги запропонованого методу: можливість роботи без використання масок приладових завад; робота з одноканальними та багатоспектральними знімками; можливість роботи з невеликими фрагментами сцени; мінімальна кількість ручних настроювань для процедур обробки; можливість роботи без додаткових знімків за інші дати; висока стійкість алгоритмів при використанні знімків з різних супутників; досить добра повторюваність результатів на супутникових знімках, зроблених у різні сезони та для різних територій. Експериментальне тестування запропонованого методу на великій кількості знімків та результати візуального аналізу оброблених знімків показали досить якісне видалення приладових спотворень сканера ЕТМ+ у порівнянні з іншими методами. Найефективнішої фільтрації завад було досягнуто на ділянках, розташованих поблизу центральної частини сцени. Розроблену технологію можна використовувати для корекції приладових спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів (супутники «Ландсат-5», «Океан-О» та ін.).

ЛІТЕРАТУРА

- 1. 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.
- 2. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения. М.: Мир, 1990.
- 3. Злобин С. Л, Стальной А. Я. Двумерное быстрое преобразование Хартли в цифровой обработке изображений. *Тр. РНТОРЭС им. А. С. Попова.* 2000. **2**. С. 114—116.
- 4. Макаров О. Л., Білоусов К. Г., Свинаренко Д. Н. та ін. Автоматизоване розпізнавання міської рослинності та водойм за знімками супутника «Jilin-1А». *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 4. С. 42—53.
- 5. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В.С. и др. Эффективная фильтрация пространственно-периодичных помех на архивных снимках. *Космічна наука і технологія*. 2014. № 4. С. 14—21.
- 6. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Эффективный метод фильтрации приборных помех на снимках от оптико-механических сканеров. V-й Междунар. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». 14—17 октября 2014 г., Харьков, ХНУРЭ. Т. 1. Тр. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системе и технологии». С. 105—108.
- 7. Маслей В. Н., Мозговой Д. К., Белоусов К. Г. и др. Методика оценки последствий добычи янтаря по многоспектральным спутниковым снимкам. *Космічна наука і технологія*. 2016. **22**, № 6. С. 26—36.
- 8. Мозговой Д. К. Применение комбинированных масок для фильтрации периодических помех. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2008. С. 175—179.
- Мозговий Д. К. Волошин В. І. Фільтрація просторово-періодичних приладових завад на супутникових знімках. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2003. 20. С. 71—75.
- 10. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Бушуев Е.И. Фильтрация радиометрических помех с пространственно-периодической структурой. Проблемы управления и інформатики. 2004. № 3. С. 97—106.
- 11. Омелич І. Ю., Яременко А. А., Непошивайленко Н. О., Горай І. В. Визначення тенденцій розвитку рослинного покриву на підставі розрахунку нормалізованого вегетаційного індексу на прикладі Петриківського району Дніпропетровської області. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі.* 2019. № 23. С. 9—13.
- 12. 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.
- 13. Федоровський О. Д., Зуб Л. М., Дьяченко Т. М. та ін. Дистанційне оцінювання екологічного стану водойм на основі багатомірної щільності розподілу площ біотопів на прикладі Київського водосховища. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5. С. 38–47.

- 14. Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Яйлимова Г. О. та ін. Супутниковий моніторинг посівів по Україні. *Космічна на ука і технологія*. 2020. **26**, № 6. С. 27—37.
- 15. Яйлимов Б. Я., Лавренюк М. С., Шелестов А. Ю., Колотій А. В., Яйлимова Г. О., Федоров О. П. Методи визначення істотних змінних для оцінки стану земного покриву. *Космічна наука і технологія.* 2018. **24**, № 4. С. 24—37.
- 16. DestripeLandsat-7 ETM+. URL: https://blamannen.wordpress.com/2011/07/12/ etm-some-thoughts (дата звернення: 30.11.2021).
- 17. Filling the Gaps to use in Scientific Analysis. URL: http://landsat.usgs.gov/sci_an.php (дата звернення: 30.11.2021).
- 18. Gap Fill for Landsat 7 images A correction of SLC-off / Luis Vega Bustillos, Environmental Engineer DATE: July 2012.
- 19. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Spirintsev V. V., Udovyk I. M. All-weather monitoring of oil and gas production areas using satellite data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. P. 137–143.
- 20. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliev V. V., Kavats O. O. Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 2. P. 99–105.
- 21. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliev V. V. Satellite monitoring of deforestation as a result of mining. *Naukovyi* Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. № 5. P. 94–99.
- 22. How to fill gaps in Landsat ETM images. URL: https://yceo.yale.edu/ landsat-etm-images (дата звернення: 30.11.2021).
- 23. Landsat 7 ETM+ Satellite Sensor. URL: https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat (дата звернення: 30.11.2021).
- 24. Landsat 7 Data Users Handbook / Department of the Interior U.S. Geological Survey, Version 2.0. EROS, Sioux Falls, South Dakota, 2019.
- 25. Landsat SLC-off: пропущені смуги не відновити? URL: https://gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=4357 (дата звернення: 30.11.2021).
- 26. Landsat 7 Satellite SLC Gap Fill Methodology. URL: https://landsat.usgs.gov/sites/default/ files/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf (дата звернення: 30.11.2021).
- Mozgovoy D., Tsarev R., Svinarenko D., Danichev A., Karnaukhov A. Instrumental Distortion Correction Method for the ETM + Scanner on Landsat-7 Multispectral Satellite Images. *Int. J. Engineering Research and Technology*. 2020. 13(12). P. 4799–4803.
- 28. Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. Filtration of Radiometric Interference with a Space-Periodic Structure. *J. Automation and Inform. Sci.* **36**. i6.20. P. 14–22.
- 29. Removing stripes from Landsat-7 SLC OFF images. URL: https://community.esri.com/ thread/164902 (дата звернення: 30.11.2021).
- 30. Satellite Missions Database. URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-7 (дата звернення: 30.11.2021).
- 31. SLC-off Products: Background. Obtenido de USGS Landsat Missions. URL: http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php (дата звернення: 30.11.2021).

REFERENCES

- 1. Artyushenko M. V., Tomchenko O. V. (2020). Percolation model to control the distribution of forest infections on images from space vehicles. *Space Sci. & Technol.*, **26**, № 4 (125), 45–56.
- 2. Brejsuell R. (1990). Hartley transform. Theory and applications. M.: Mir (in Russian)
- Zlobin S. L, Stal'noj A. Ya. (2004). Two-dimensional Fast Hartley Conversion in digital image processing. Proc. of A.S. Popov RSTSREEC, 2, 114–116 (in Russian).
- 4. Makarov O. L., Bilousov K. G., Svinarenko D. N., Khoroshylov V. S., Mozgovoy D. K., Popel V. M. (2021). Automatized recognition of urban vegetation and water bodies by Jilin-1A satellite images. *Space Sci. & Technol.*, 27, № 4, 42–53. https://doi.org/10.15407/knit2021.04.042
- 5. Makarov A. L., Mozgovoj D. K., Horoshilov V. S., Balashov V. N., Maslyey D. V., Popel' V. M. (2014). Efficient filtering of space-periodic distortions on archive images. *Kosm. nauka tehnol.*, 20, № 4, 14–21. https://doi.org/10.15407/ knit2014.04.014.
- Makarov A. L., Mozgovoj D. K., Khoroshilov V. S., et al. (2014). Effective Method Filtration of Attachments on Snacks from Opto-Mechanical Scanners. The V Int. Forum "Applied radioelectronics. Share and prospects for development", 14–17 October 2014., Kharkiv, KNURE. Vol. 1. Conference "Integrated information radio-electronic system and technologies", 105–108.
- 7. Maslej V. N., Mozgovoj D. K., Bilousov K. G., Horoshilov V. S., Bushanska O. S., Galich N. G. (2016). Methods of the impact evaluation of amber mining by multispectral satellite images. *Space Sci. & Technol.*, **22**, № 6, 26–36.
- 8. Mozgovoj D. K. (2008). Consigned combined masks for filtration of periodic interference. Interagency scientific and technical collection "Applied geometry and engineering graphics". K.: Ukrainian Association of Applied Geometry, 175–179.

- 9. Mozgovij D. K. Voloshin V. I. (2003). Filtration of spatial-periodic devices for satellite images. *Publ. Taurian State Agrotechnical Academy*. № 4. Applied geometry and ingineering graphics, **20**, 71–75.
- 10. Mozgovoj D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. (2004). Filtration of radiometric interference with a space-periodic structure. *Problems of Control and Informatics*, № 3, 97–106.
- Omelych I., Yaremenko A., Neposhyvailenko N., Ghoraj I. (2019). Determination of vegetation cover trends based on the calculation of the normalized vegetation index on the example of Petrykivskyi district of Dnipropetrovsk region. Ukrainian J. Remote Sensing, № 23, 9–13.
- 12. Popov M. O., Lyal'ko V. I., Stankevich S. A. (2019). Ukrainian national system for Earth's remote sensing: look for efficient solutions. *Space Sci. & Technol.*, **25**, № 6, 39–50.
- 13. Fedorovskyi O. D., Zub L. N., Dyachenko T. N., Tomchenko O. V., Khyzhniak A. V., Yakymchuk V. H. (2020). Remote assessment of the ecological state of water bodies based on the multidimensional density distribution of biotope areas on the example of the Kyiv reservoir. *Space Sci. & Technol.*, **26**, № 5 (126), 38–47.
- Shelestov A. Yu., Yailymov B. Ya., Yailymova H. O., Bilokonska Y. V., Nivievskyi O. V. (2020). Satellite crop monitoring for Ukraine. Space Sci. & Technol., 26, № 6 (127), 27–37. https://doi.org/10.15407/knit2020.06.027
- 15. Yailymov B. Ya., Lavreniuk M. S., Shelestov A. Yu., Kolotii A. V., Yajlymova G. O., Fedorov O. P. (2018). Methods of essential variables determination for the Earth's surface state assessing. *Space Sci. & Technol.*, **24**, № 4, 24–37. https://doi. org/10.15407/knit2018.04.026
- 16. DestripeLandsat-7 ETM+. URL: https://blamannen.wordpress.com/2011/07/12/ etm-some-thoughts (Last accessed: 30.11.2021).
- 17. Filling the Gaps to use in Scientific Analysis. URL: http://landsat.usgs.gov/sci_an.php (Last accessed: 30.11.2021).
- 18. Gap Fill for Landsat 7 images A correction of SLC-off / Luis Vega Bustillos, Environmental Engineer DATE: July 2012.
- 19. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Spirintsev V. V., Udovyk I. M. (2019). All-weather monitoring of oil and gas production areas using satellite data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 6, 137–143.
- 20. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliev V. V., Kavats O. O. (2017). Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 2, 99–105.
- 21. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliev V. V. (2017). Satellite monitoring of deforestation as a result of mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, 94–99.
- 22. How to fill gaps in Landsat ETM images. URL: https://yceo.yale.edu/ landsat-etm-images (Last accessed: 30.11.2021).
- 23. Landsat 7 ETM+ Satellite Sensor. URL: https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat (Last accessed: 30.11.2021).
- 24. Landsat 7 Data Users Handbook / Department of the Interior U.S. Geological Survey, Version 2.0. EROS, Sioux Falls, South Dakota, 2019.
- 25. Landsat SLC-off: propushcheni smugi ne vidnoviti? URL: https:// gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=4357 (Last accessed: 30.11.2021).
- Landsat 7 Satellite SLC Gap Fill Methodology. URL: https://landsat.usgs.gov/sites/default/ files/documents/SLC_Gap_ Fill_Methodology.pdf (Last accessed: 30.11.2021).
- Mozgovoy D., Tsarev R., Svinarenko D., Danichev A., Karnaukhov A. (2020). Instrumental Distortion Correction Method for the ETM + Scanner on Landsat-7 Multispectral Satellite Images. *Int. J. Engineering Research and Technology*, 13(12), 4799–4803.
- 28. Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. Filtration of Radiometric Interference with a Space-Periodic Structure. J. *Automation and Inform. Sci.*, **36**. i6.20, 14–22.
- 29. Removing stripes from Landsat-7 SLC OFF images. URL: https://community.esri.com/ thread/164902 (Last accessed: 30.11.2021).
- 30. Satellite Missions Database. URL: https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-7 (Last accessed: 30.11.2021).,
- SLC-off Products: Background. Obtenido de USGS Landsat Missions. URL: http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_ data.php (Last accessed: 30.11.2021).

Стаття надійшла до редакції	31.01.2022	Received 31.01.2022
Після доопрацювання	31.01.2022	Revised 31.01.2022
Прийнято до друку	14.04.2022	Accepted 14.04.2022

*K. H. Bilousov*¹, Chief Designer – Head of the Design Office of Spacecraft and Sites System Engineering *M. V. Nechyporuk*², Rector of National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Dr. Sci. in Tech., Professor *V. S. Khoroshylov*¹, Leading Researcher, , Dr. Sci. in Tech., Head of Department in the Design Office of Spacecrafts and Sites System Engineering, «Honored Worker of Science and Technology of Ukraine» *D. M. Svynarenko*³, Vice-rector for Scientific and Pedagogic Work, Ph. D. in Tech., Professor at the Department of Telecommunication Systems and Networks *D. K. Mozgovoy*³, Associate Professor at the Department of Physics, Electronics, and Computer Systems, Ph. D. in Tech. *V. M. Popel*^{'1}, Deputy Chief of the Department in the Design Office of Spacecraft and Sites System Engineering
¹ Yangel Yuzhnoye State Design Office
3, Kryvorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

² National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

17, Chkalova St, Kharkiv, 61000 Ukraine

³ Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarina Ave, Dnipro, 49010 Ukraine

METHOD OF AUTOMATED CORRECTION OF INSTRUMENT DISTORTIONS ON LANDSAT-7 MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES

An alternative method of automated correction of instrumental distortions of the ETM + scanner on Landsat-7 multispectral satellite images is proposed. The method is based on the application of filtering in the field of spatial frequencies using fast Fourier transform and spectral masks. The parameters of the mask are determined by a known spatial period of interference or experimentally by the results of the filtration. To filter the area of spatial frequencies to be removed, a filtering mask is applied, consisting of pixels with zero values. Periodic components whose spatial period corresponds to the spatial frequencies filtered on the Fourier image will be removed from the filtered image. The quality of filtration is determined by the mask used. When using multispectral images, a filter mask based on the Fourier image of one of the spectral channels is applied to filter other channels. The results of visual analysis of the processed images showed a fairly high-quality correction and elimination of instrumental distortions of the ETM + scanner in comparison with other methods. The main advantages of the proposed method are the next: the ability to work without the use of metadata and masks of instrumental distortion; work with single-channel and multispectral images; ability to work with small fragments of the scene; minimum number of manual settings for processing procedures; possibility to work without additional pictures for other dates; high stability of the used algorithms when using images from different satellites; fairly good repeatability of the results on satellite images taken in different seasons and for different areas. Experimental testing of the proposed method on a large number of images also confirmed the good repeatability and high stability of the algorithms used. It is expected that the developed technology will also be successfully used to correct instrumental spatial-periodic distortions in archival satellite images obtained using other optical-mechanical scanners.

Keywords: Landsat-7 satellite, ETM + scanner, multispectral images, instrumental distortions, fast Fourier transform, spectral masks.

Дослідження Землі з космосу Study of the Earth from Space

https://doi.org/10.15407/knit2022.03.029 УДК (55:528.8):061.6(477)

В. І. ЛЯЛЬКО, гол. наук. співроб., акад. НАН України, д-р геол.-мін. наук, проф. Е-mail: vilyalko31@ukr.net
М. О. ПОПОВ, дир., член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Е-mail: mpopov@casre.kiev.ua
О. В. СЕДЛЕРОВА, заст. дир., канд. геол. наук, старш. наук. співроб. Е-mail: sedlerovaolga@gmail.com
А. В. ХИЖНЯК, уч. секр., канд. техн. наук
E-mail: avsokolovska@gmail.com
Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі

Інституту геологічних наук Національної академії наук України» вул. О. Гончара 55-Б, Київ, Україна, 01054

НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ: ШЛЯХ ДОВЖИНОЮ 30 РОКІВ

Статтю підготовлено до 30-річчя створення Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України» і присвячено історії розвитку аерокосмічних досліджень Землі в Україні, зокрема місцю Центру в дослідженнях з дистанційного зондування Землі, які виконуються установами Національної академії наук України. Висвітлено історію створення Центру, його наукових шкіл та основних напрямів дослідження, окреслено перспективи подальшого розвитку.

Наведено дані про організаційну структуру Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі і здобутки наукового колективу. Проаналізовано внесок його співробітників у розвиток аерокосмічних досліджень в Україні. Представлено міжнародну діяльність Центру та його співробітників. Розглядаються подальші перспективи і плани розвитку наукових досліджень в Центрі, які базуються на основних положеннях розвитку світового суспільства, визначених рішеннями ООН зі сталого розвитку.

Ключові слова: Науковий центр, аерокосмічні дослідження, стратегія розвитку, сталий розвиток.

вступ

Успішні запуски перших штучних супутників Землі продемонстрували реальність використання космосу для дистанційного вивчення найрізноманітніших проблем, з якими з наростаючою силою стикається людство: забруднення природного середовища і негативні процеси в біорізноманітті, брак питної води і енергетичних ресурсів, зміни клімату, збільшення природних катастроф, деградація земель тощо. І вже на початку 1960-х років у розвинених країнах світу широким фронтом розпочались наукові і науково-практичні дослідження, спрямовані на вирішення зазначених проблем за допомогою даних, що надходили з супутників.

Цитування: Лялько В. І., Попов М. О., Седлерова О. В., Хижняк А. В. Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України: шлях довжиною 30 років. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 29—42. https://doi.org/10.15407/knit2022.03.029

Україну не оминула ця тенденція. Багато українських вчених і наукових колективів активно залучились до космічної діяльності; вони брали участь у постановці наукових експериментів, створенні бортових технічних приладів для орбітальних апаратів і наземних систем прийому космічної інформації, розробці методів обробки та аналізу супутникових даних тощо.

Так накопичувався первинний безцінний досвід космічної діяльності, з'явилися перші здобутки. Після розпаду СРСР все це дозволило Україні вирушити у самостійне «космічне плавання». Вже у перші роки незалежності до космічної тематики підключились наукові та науково-технічні організації і установи, промислові підприємства Дніпропетровська, Євпаторії, Києва, Севастополя, Харкова тощо.

У 1992 році всі конструкторські бюро, наукові організації, установи, підприємства, які безпосередньо займалися космічною діяльністю, були переведені під управління Національного космічного агентства України (НКАУ), створеного Указом Президента України (НКАУ), створеного Указом Президента України (1994—1997 рр.), яка заклала правову базу космічної діяльності, і в якій були визначені основні напрямки розвитку і пріоритети космічної галузі в інтересах національної економіки і безпеки України.

Одним з пріоритетів Першої космічної програми України було визначено дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Було розроблено і запущено кілька українських супутників з апаратурою видової зйомки. Для оброблення супутникових даних і вирішення на їхній основі актуальних тематичних задач був задіяний цілий ряд організацій і установ — Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України (ЦАКДЗ), Морський гідрофізичний інститут НАН України, Державне підприємство «Дніпрокосмос» НКАУ, Центр радіофізичного зондування Землі НАНУ-НКАУ, Державний науково-виробничий центр «Природа» НКАУ, Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ та ін. Постановою Президії НАН України від 26.02.1997 р. №77 «Про діяльність ЦАКДЗ ІГН НАН України по вирішенню природоресурсних та природоохоронних проблем» на Центр покладено науково-методичне керівництво дослідженнями з дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які виконуються установами НАН України.

30-річчю створення ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України» і присвячено дану статтю.

СТВОРЕННЯ І СЬОГОДЕННЯ НАУКОВОГО ЦЕНТРУ АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІГН НАН УКРАЇНИ

У 1987 році за ініціативою Президента Академії наук УРСР академіка Б. Є. Патона при Відділенні наук про Землю було створено Наукову раду з проблеми «Вивчення природних ресурсів дистанційними методами» (Постанова Президії АН УРСР № 186 від 29.05.1987 р.). Однією з рекомендацій Наукової ради була доцільність створення в Академії наук організації, орієнтованої на проведення фундаментальних та прикладних наукових досліджень Землі дистанційними аерокосмічними методами. Таку організацію під назвою «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України» (далі — Центр або ЦАКДЗ) було створено у 1992 році (Постанова Президії АН України № 150 від 20.05.1992 р.)

Центр був організований на базі Відділу тепломасопереносу в земній корі ІГН АН України (завідувач — доктор геолого-мінералогічних наук В. І. Лялько) і Київського відділу Інституту геології і розробки горючих копалин тодішнього Міністерства нафтової і газової промисловості СРСР (Київського науково-дослідного інституту космоаерометодів після оголошення незалежності України) (керівник — кандидат геологомінералогічних наук В. М. Перерва).

Головне завдання, покладене на Центр, проведення фундаментальних та прикладних наукових досліджень Землі дистанційними аерокосмічними методами з метою одержання нових наукових знань і практичного впровадження цих знань в інтересах інноваційного розвитку України та задоволення економічних і соціальних потреб.

Упродовж майже 25 років Центр очолював доктор геолого-мінералогічних наук В. І. Лялько



Рис. 1. Співробітники ЦАКДЗ ІГН НАН України

(з 2010 року — академік НАН України). Сьогодні В. І. Лялько є Почесним директором Центру.

На даний час у Центрі працює понад 70 співробітників (рис. 1), з них дві третини — науковці, серед яких академік НАН України, два члени-кореспонденти НАН України, 10 докторів наук, 24 кандидати (геологічних, географічних, технічних, фізико-математичних і біологічних наук).

У Центрі під керівництвом академіка НАН України В. І. Лялька розвивається наукова школа «Енергомасообмін у геосистемах». Досліджуються процеси енергомасообміну в геосистемах та їхній вплив на фізико-хімічні та біологічні механізми, які відповідають за формування спектрального відгуку природних об'єктів. Науковці Центру працюють над застосуванням космічної інформації при пошуках рудних, нерудних та горючих корисних копалин як на суходолі, так і на шельфі, вивчають зв'язки між геофізичними полями, прогнозують сейсмічні явища, уточнюють будову «шовних» зон та інших тектонічних структур тощо.

У Центрі розробляються ефективні космічні методи й технології для вирішення ряду актуальних для України завдань раціонального природокористування, зокрема пошуків нафтогазових покладів на суходолі та шельфі, що дозволило майже вдвічі підвищити результативність відповідних робіт. Цю технологію практично апробовано не лише в Україні, але й у колишніх республіках СРСР, Об'єднаних Арабських Еміратах, Марокко і Мавританії; оцінювання стану та врожайності агрокультур; аналізу екологічного стану територій і акваторій у режимі моніторингу; космічного моніторингу тепловтрат на урбанізованих територіях; космічного моніторингу (аудиту) балансу парникових газів та ін.

Здійснюється підготовка аспірантів з наукових спеціальностей 103— Науки про Землю та



Рис. 2. Виставка наукових розробок «Установи НАН України — місту Києву» (2014 р.). Академік НАН України В. І. Лялько представляє В. Кличку, голові КМДА, наукові розробки Центру

172 — Телекомунікації та радіотехніка, докторантура.

У науковому здобутку Центру — атласи «Україна з космосу» та «Космос — Україні», комп'ютерно дешифровані космознімки українськоросійського космічного апарата «Океан-О», українських супутників «Січ-1» і «Січ-2», в яких показано можливість їхнього використання для вирішення актуальних для України природоресурсних і природоохоронних завдань.

Разом із Міжнародним інститутом прикладного системного аналізу (IIASA) та в рамках Міжнародної програми «Партнерські ініціативи в галузі наук про Землю з вивчення Північної Євразії» (NEESPI) у 2010 та 2012 рр. опубліковано російський та англомовний варіанти монографії «Изменения земных систем в Восточной Европе».

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

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

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

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

Результати досліджень Центру відображені у понад 900 публікаціях у вітчизняних і зарубіжних виданнях насамперед у 18 монографіях. Найбільш значущі з них такі: «Аэрокосмические методы в геоэкологии», «Україна з космосу» [6], «Космос — Україні: Атлас дешифрованих знімків території України з КА «Океан» та інших космічних апаратів» [7], «Інформатизація аерокосмічного землезнавства» [4], «Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування» [9], «Изменения земных систем в Восточной Европе» [10], «Earth Systems Change over Eastern Europe» [26], «Спутниковые методы поиска полезных ископаемых» [11] «Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин» [13], «Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки» [12]. Співробітниками Центру складено державні стандарти [2, 3], словники [8], навчальну літературу [1, 5, 15] та науково-методичний посібник «Аерокосмічні дослідження геологічного середовища» [14].

За тридцять років діяльності Центру співробітниками було створено 44 патенти на винахід. За підсумками конкурсу установ НАН України за досягнення кращих показників у винахідницькій роботі, створенні, охороні та використанні об'єктів інтелектуальної власності Центр неодноразово отримував першу премію серед установ Відділення наук про Землю НАН України. Створені винаходи ефективно використовуються для: зменшення витрат на дешифрування аерокосмічних зображень; підвищення достовірності дешифрування; прискорення процесів дешифрування; автоматизації процесів відновлення цифрових знімків; автоматизації процесів дешифрування; підвищення ефективності проведення геологорозвідувальних робіт; підвищення ефективності нафтогазопошукових



Рис. 3. Міжнародна спеціалізована виставка «НІ-ТЕСН ЕХРО. Високі технології», 2017 р. Зліва направо: академік НАН України О. М. Пономаренко, доктор геологічних наук М. М. Шаталов, академік НАН України А. Г. Загородній та кандидат геологічних наук О. В. Седлерова

робіт; оцінки площинного розподілу вологи верхнього шару відкритого ґрунту; підвищення повноти огляду земної поверхні; підвищення достовірності виявлення та розпізнавання штучних та природних об'єктів у різних умовах; дистанційної оцінки екологічного стану водних екосистем; виявлення аномалій довкілля різного походження.

З березня 2014 року на базі Центру видається перший в Україні профільний електронний «Український журнал дистанційного зондування Землі» (http://ujrs.org.ua/ujrs) наказом Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886 електронне видання «Український журнал дистанційного зондування Землі» включено до Переліку наукових фахових видань України з галузей геологічних і технічних наук (спеціальності 103 — Науки про Землю і 172 — Телекомунікації та радіотехніка), категорія Б. З переліком наукових публікацій працівників Центру можна ознайомитися на сайтах https:// www.casre.kiev.ua/uk/publications та електронного «Українського журналу дистанційного зондування Землі» (http://ujrs.org.ua/ujrs).

Розробки Центру успішно демонструються на профільних виставках вітчизняного та міжнародного значення (рис. 2, 3).

В ЦАКДЗ функціонує Центр колективного користування, до матеріально-технічної бази якого входять: польовий прецизійний спектрорадіометр FieldSpec3FR, система дистанційної реєстрації мінливості спектрометричних параметрів середовища DJI STS-VIS, система реєстрації змін CO₂ на основі газометричної апаратури Qubit Systems 150, тепловізійна система FLUKE Ti110, багатоспектральна камера DMS, інфрачервона камера One Pro, фотометричні прилади KФ-08 і CФ-18, пірометри TROTEC TP-10 і ADA instruments Infrared Thermometer TemPro-1200, квадрокоптери Phantom 3 Standard, Phantom 4 Multispectral, Bebop Pro Thermal та ін.

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ У ВІДДІЛАХ ЦЕНТРУ

Організаційно ЦАКДЗ складається з п'яти відділів.

• Відділ енергомасообміну у геосистемах (завідувачка — кандидат географічних наук Л. О. Єлістратова). До складу Відділу входить Лабораторія технічних засобів дистанційного зондування Землі (завідувач — кандидат геологічних наук С. С. Дугін).

• Відділ геоінформаційних технологій у дистанційному зонуванні Землі (завідувач — членкореспондент НАН України М. О. Попов). До складу Відділу входить Лабораторія методів обробки даних дистанційного зондування (завідувачка — кандидат технічних наук І. О. Пєстова).

• Відділ аерокосмічних досліджень у геології (завідувач — доктор геологічних наук С. М. Єсипович).

• Відділ геопросторового моделювання в аерокосмічних дослідженнях (завідувач — доктор технічних наук С. А. Станкевич).

• Відділ аерокосмічних досліджень в геоекології (завідувач — кандидат геологічних наук В. Є. Філіпович).

Відділ енергомасообміну в геосистемах. Завідувач відділу — кандидат географічних наук Л. О. Єлістратова (до 2018 року відділ очолював академік НАН України В. І. Лялько).

У відділі виконано значний обсяг теоретикометодичних і практичних досліджень: створено моделі процесів формування ресурсів підземних вод; розроблено методи розрахунку тепло- і масопереносу в земній корі; обгрунтовано доцільність захоронення токсичних промислових стоків у надра; розроблено критерії геотермічних пошуків корисних копалин, зокрема підземних вод та вуглеводневої сировини; узагальнено теоретикометодичні засади застосування матеріалів космічного знімання для вирішення актуальних завдань раціонального природокористування, наприклад: пошуків нафтогазових покладів на шельфі та суходолі, оцінювання фітосанітарного стану та пожежонебезпечності лісів, прогнозування стану й урожайності зернових культур та екологічної ситуації в екосистемах. Розроблено та застосовано нові ефективні методи й технології інтерпретації матеріалів сучасних аерокосмічних гіперспектральних зйомок [16, 17, 20].

Уперше на основі матеріалів багатоспектральних космічних знімань експериментально визначено основні балансові складові формування парникового ефекту в межах України з метою виявлення кількісних показників для обґрунтування виділених нашій державі квот парникових газів відповідно до Кіотського протоколу. Передбачено довготермінові сценарії кліматичних та екологічних змін на регіональному і локальному рівнях. Визначено стратегії адаптації, зокрема у зв'язку з прогнозованою ескалацією природних катастроф.

Відділ геоінформаційних технологій у ДЗЗ. Завідувач відділу — член-кореспондент НАН України М. О. Попов. Відділ створено у 2004 р. Основні напрями досліджень — інформаційнометодичне та алгоритмічне забезпечення робіт із ДЗЗ, а саме: методичне й алгоритмічне забезпечення інтерпретації аерокосмічних зображень; обґрунтування вимог щодо обліку перспективних бортових комплексів ДЗЗ; розроблення методів оцінювання якості та інформаційних властивостей багато- і гіперспектральних аерокосмічних зображень; опрацювання методології тестування супутникових технологій на основі геоінформаційних технологій і польових полігонних вимірювань; створення вітчизняної понятійно-нормативної бази у галузі ДЗЗ, її вдосконалення і гармонізація з відповідними міжнародними стандартами та нормами.

Співробітники відділу розробляють теоретико-методичні основи оброблення та аналізу багато- і гіперспектральних аерокосмічних зображень для вирішення різноманітних тематичних завдань ДЗЗ, ефективні алгоритми автоматизованої інтерпретації аерокосмічних зображень [27—30]. Результати проведених досліджень впроваджуються при вирішенні завдань реальної економіки та оборонної тематики.

Відділ аерокосмічних досліджень у геології. Завідувач відділу — доктор геологічних наук С. М. Єсипович. Науковий напрям відділу розроблення методології вирішення геологічних завдань на базі широкого використання матеріалів аерокосмічних зйомок у комплексі з геологогеофізичними, геохімічними та іншими даними. За допомогою матеріалів космічного знімання створено нові технології пошуку покладів вуглеводнів на суходолі та шельфі; апробовано супутникову технологію прогнозування покладів нафти і газу у межах Дніпровсько-Донецької западини, а на окремих її площах оцінено перспективи нафтогазоносності [25].

Результати апробації технологій відкривають перспективи для прогнозування нових родовищ вуглеводнів, що дозволить значною мірою вирішити паливно-енергетичну проблему України, використовуючи власну сировинну базу. Застосування зазначених технологій дає змогу підвищити геологічну й економічну ефективність геологорозвідувальних робіт щодо виявлення покладів нафти і газу, збільшити обсяг приросту запасів вуглеводневої сировини на фоні зниження фінансових витрат.

Розроблено дистанційну методику аналізу нафтогазового потенціалу шельфу Чорного моря; здійснено рейтингове оцінювання нафтогазоперспективних об'єктів на шельфі, визначено структурно-геоморфологічні та геолого-геофізичні критерії для північно-західного шельфу Чорного та акваторії Азовського морів.

Створено комплекс методів прогнозування нафтогазоперспективних об'єктів Дніпровсько-Донецької западини, який включає регіональний, зональний і детальний рівні, кореляцію поверхневих і глибинних аномалій. Рекомендації за результатами досліджень впроваджені у НАК «Нафтогаз України», ПАТ «Укрнафта», ПАТ «Укргазвидобування».

Відділ геопросторового моделювання в аерокосмічних дослідженнях. Завідувач відділу — доктор технічних наук С. А. Станкевич (до 2021 року цей відділ під назвою «Відділ системного аналізу» очолював член-кореспондент НАН України О. Д. Федоровський).

Відділ створено у 2002 р. з метою проведення науково-дослідних робіт у рамках наукового об-грунтування і впровадження методів системного

аналізу для вирішення геоекологічних і природоресурсних завдань на основі аерокосмічної інформації ДЗЗ.

Основні напрями досліджень: розроблення наукових основ системного моделювання процесу одержання інформації космічними системами ДЗЗ, визначення їхньої оптимальної структури, параметрів та ефективності використання; опрацювання системної методології розвитку та підвищення ефективності космічного геомоніторингу для вирішення ресурсних і екологічних завдань природокористування.

У відділі створено наукові основи для моделювання процесу одержання інформації космічними системами ДЗЗ, визначено їхню оптимальну структуру, параметри та ефективність використання. Сформовано системну методологію розвитку та підвищення ефективності аерокосмічного геомоніторингу для вирішення проблем природокористування в умовах збільшення обсягу виконуваних тематичних завдань [18, 19, 21].

Відділ аерокосмічних досліджень у геоекології. Завідувач відділу — кандидат геологічних наук В. Є. Філіпович.

Основними завданнями та функціями відділу є створення нових методів і технологій комп'ютерного оброблення та інтерпретації аерокосмічних зображень для екологічного моніторингу в умовах трансформації урбанізованих територій. У відділі опрацьовано методичні принципи і технології використання супутникової інформації під час виконання геолого-знімальних робіт в Україні; запропоновано на основі використання космічних даних модернізацію методики оцінювання шкоди державі внаслідок нелегального видобування бурштину [22—24].

На основі дистанційних даних побудовано просторово-часові моделі підтоплення територій ґрунтовими водами в умовах міських агломерацій; розроблено методичні прийоми виявлення техногенного забруднення урбанізованих територій важкими металами, а також джерел забруднень водного середовища.

Створено методичні засади оцінювання геоекологічного стану промислових районів (для Нікополя, Борислава, Києва, Кривого Рогу,



Рис. 4. Рафалівський рудний вузол. Польові геологічні дослідження на відслоненнях Рафалівського базальтового кар'єру. Зліва — провідний інженер відділу АКДГЕ О. І. Кудряшов, справа — завідувач відділу кандидат геологічних наук В. Є. Філіпович

Запоріжжя, Херсона, Миколаєва, Маріуполя) (рис. 4). На основі використання космічної інформації, цифрових моделей рельєфу та геолого-геоморфологічних даних дано обґрунтування прогнозу розвитку зсувонебезпечних процесів на окремих ділянках Придніпровської зсувної зони (м. Київ). Розроблено методику аналізу теплового поля урбанізованих територій за даними космічної зйомки та наземних термометричних досліджень (на прикладі м. Києва).

Створено просторово-часові ряди теплового поля м. Київ, що дозволяє у моніторинговому режимі аналізувати динаміку теплового навантаження на місто, визначати ділянки з підвищеним тепловим забрудненням; проведено районування території міста за ступенем комфортності проживання населення: дано рекомендації щодо прийняття управлінських рішень з метою поліпшення містобудівного планування. Розроблено методичні основи застосування космічних і наземних даних у тепловому діапазоні для оцінки тепловтрат у місті по лінії «місто — район — окремий будинок». Результати проведених робіт використовують природоохоронні та комунальні структури Київської міської держадміністрації.

Напрацювання відділу з використання дистанційних даних для геології та геоекології впродовж останніх 20 років регулярно впроваджуються у підприємствах Державної геологічної служби України.

МІЖНАРОДНЕ СПІВРОБІТНИЦТВО

ЦАКДЗ — перша в Україні наукова організація, прийнята до Європейської асоціації лабораторій дистанційного зондування (European Association of Remote Sensing Laboratories). Центр підтримує наукові зв'язки з установами Німеччини, Фран-


Рис. 5. Засідання Неформальної робочої групи по сенсорах в рамках Договору про Відкрите небо (м. Відень, Австрія; 13.06.2012)



Рис. 6. Стажування в рамках міжнародного проекту «ЕсоМіпіпд Розробка інтегрованої докторської програми для сталої гірничо-екологічної діяльності» (Технічний університет «Фрайберзька гірнича академія», Фрайберг, Німеччина, 2019 р.)

ції, Японії, Угорщини, Польщі, Китаю, Марокко та ін.

Співробітники Центру є членами міжнародного Комітету з науки та технологій (Science and Technology Committee GEO), багато років гідно представляють Україну (за Указами Президента України) у якості експертів по Договору «Відкрите небо» (Open Skies Treaty) в Організації з безпеки і співробітництва в Європі (Organization for Security and Co-operation in Europe) (рис. 5), співпрацюють із зарубіжними колегами з наукових інститутів та університетів, беруть участь у міжнародних конференціях та проходять стажування (рис. 6).

ЩО ДАЛІ?

З кожним роком методи і технології ДЗЗ удосконалюються, становляться все більш затребуваними. Поступово поширюється коло задач, для вирішення яких їх використовують. Цьому сприяють відносна доступність і висока якість сучасних супутникових зображень, а також наявність достатньо великої кількості програмних продуктів, зокрема з відкритим кодом, для їхньої обробки. Є і ще один суттєвий чинник — це стрімкий розвиток «дронних» технологій.

Все це, безумовно, сприяє колективу Центру працювати на виконання покладеного при його заснуванні 30 років тому завдання на проведення наукових досліджень Землі аерокосмічними методами і впровадження отримуваних знань в інтересах інноваційного розвитку України та задоволення економічних і соціальних потреб. Разом з тим, враховуючи особливі умови, в яких перебуває наша країна в останні роки, потребують корегування планів наукових досліджень в бік конкретизації одержуваних результатів і підвищення їхньої практичної спрямованості.

Планами подальшої діяльності, розвитку наукових досліджень у ЦАКДЗ передбачається: • продовження досліджень щодо створення нових наукоємних технологій пошуку родовищ корисних копалин, методів виявлення та аналізу розвитку загрозливих природних та природно-техногенних процесів та явищ, способів екологічного контролю видобування стратегічних корисних копалин, удосконалення методів та технології прогнозування врожайності сільськогосподарських культур за даними ДЗЗ тощо. Особлива увага буде приділятись науково-практичним розробкам і технологіям, які затребувані потребами оборони і національної безпеки;

• обгрунтування і здійснення необхідних кроків щодо введення в державну систему підготовки наукових кадрів вищої кваліфікації (докторів наук) наукової спеціальності «Дистанційні аерокосмічні дослідження» (геологічні, технічні і фізико-математичні науки). Створення при ЦАКДЗ спеціалізованої вченої ради з правом прийому для захисту докторських дисертацій з означеної наукової спеціальності;

• дооснащення Центру колективного користування спектрометричної апаратури, що функціонує в ЦАКДЗ, більш потужними мобільними платформами (дронами) для проведення аерозйомки, сучасними високоякісними бортовими і наземними технічними засобами вимірювання сигналів фізичних полів;

• підготовка «Українського журналу дистанційного зондування Землі», що видається Центром, до індексування у міжнародних науковометричних реферативних базах;

• зміцнення і поширення наукових зв'язків з науковими установами інших країн, участь у міжнародних конференціях.

Плани подальшої діяльності ЦАКДЗ базуються на основних положеннях розвитку світового суспільства, визначених рішеннями ООН зі сталого розвитку, а їхня реалізація буде сприяти задоволенню економічних, оборонних і соціальних потреб України.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Бурштинська Х. В., Станкевич С. А. *Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб*. Львів: Львівська політехніка, 2010. 292 с.
- 2. ДСТУ42202003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять. Київ: Держспоживстандарт України, 2003. 18 с.
- 3. ДСТУ4758:2007. Дистанційне зондування Землі з космосу. Оброблення даних. Терміни та визначення понять. Київ: Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.
- 4. Довгий С. О., Лялько В. І. (ред.). Інформатизація аерокосмічного землезнавства. Київ: Наук. думка, 2001. 606 с.
- Довгий С. О., Лялько В. І., Бабійчук С. М., Кучма Т. Л., Томченко О. В., Юрків Л. Я. Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування: навч. посіб. Київ: Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. 316 с. ISBN 978-617-7734-01-6
- 6. Лялько В. І., Федоровський О. Д. (ред.). Україна з космосу (Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів): 2-е вид. Київ: Наук. думка, 1999. 34 с.
- 7. Лялько В. І., Федоровський О. Д. (ред.). Космос Україні (Атлас дешифрованих знімків території України з КА «Океан» та інших космічних апаратів). Київ: Наук. думка, 2001. 106 с.
- 8. Лялько В. І., Попов М. О. (ред.). Словник із дистанційного зондування Землі. Київ: СМП АВЕРС, 2004. 170 с.
- 9. Лялько В. І., Попов М. О. (ред.). Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування. Київ: Наук. думка, 2006. 358 с.
- 10. Лялько В. И. (ред.). Изменения земных систем в Восточной Европе. Київ: Фолиант, 2010. 581 с.
- 11. Лялько В. И., Попов М. А. (ред.). Спутниковые методы поиска полезных ископаемых. Киев: Карбон-Лтд, 2012. 436 с.
- 12. Лялько В. І. (ред.). Парниковий ефект і зміни клімату в Україні: оцінки та наслідки. Київ: Наук. думка, 2015. 283 с. ISBN 978-966-00-1526-5
- 13. Лялько В. І., Попов М. О. (ред.). *Сучасні методи дистанційного пошуку корисних копалин* (електронне видання). Київ, 2017. 220 с.
- Мичак А. Г., Філіпович В. Є., Приходько В. Л. та ін. Аерокосмічні дослідження геологічного середовища: наук.-метод. посіб. Київ: Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, Державна геологічна служба України, 2010. 246 с.
- 15. Попов М. А., Кудашев Е. Б. (ред.). Инфраструктура спутниковых геоинформационных ресурсов и их интеграция: Сб. науч. ст. Киев: Карбон-Сервис, 2013. 192 с.
- 16. Apostolov A. A., Yelistratova L. A., Romanciuc I. F., Zakharchuk I. Identifying potential landslide areas by employing the erosion relief index and meteorological criteria in Ukraine. *Rev. Roum. Géogr. / Rom. J. Geogr.* 2021. 65, (2). P. 125–141.
- Apostolov O. A., Elistratova L. O., Romanchuk I. F., Chekhniy V. M. Assessment of desertification areas in Ukraine by estimation of water indexes using remote sensing data. *Ukr. Geographical J.* 2020. 1(109). P. 16–25. https://doi.org/10.15407/ ugz2020.01.016
- Arkhipov A. I., Glazunov N. M., Khyzhniak À. V. Heuristic criterion for class recognition by spectral brightness. *Cybern Syst Anal.* 2018. 54. P. 94–98. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0010-7
- Artiushenko M. V., Khyzhniak A. V. Methodology of fire safety monitoring for peatlands using space survey. J. Automat.and Inform. Sci. 2020. 52, No. 7. P. 63–73. https://doi.org/10.1615/JAUTOMATINFSCIEN. V52.17.60
- Azimov O. T., Trofymchuk O. M., Kuraeva I. V., Zlobina K. S., Karmazinenko S. P., Dorofey Ye. M. Ecological and geochemical study of the state of soil deposits in the impact areas of municipal solid waste landfills. 19th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. Kyiv, Ukraine. *Conf. Proc.* 2020. 2020. 1–7. https://doi. org/10.3997/2214-4609.2020geo133
- Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. *Space Science and Technology*. 2021. 27, No. 5. C. 10–18. https://doi.org/10.15407/knit2021. 5.011
- Filipovich V., Mychak A., Krylova A. Use satellite data in monitoring ecological condition of urban landscape. 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Albena, Bulgaria, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Section Cartography and GIS, Conference Proceedings. 2014. Vol. III. P. 1061–1068. DOI: 10.5593/SGEM2014/ B23/S11.134
- Filipovych V. Ye., Shevchuk R. M., Mychak A. H. Satellite imagery application for searching buried intrusive structures. *Sci. innov.* 2022. 18(2). P. 59–65. https://doi.org/10.15407/scine18.02.059
- Filipovych Volodymyr Ye., Lyalko Vadim I., Lischenko Lyidmila P., Pazynych Natalia V., Teremenko Alexsandr N., Krylova Anna B. Remote sensing monitoring of historical centre of Kyiv for reducing risks from disasters at world heritages properties. J. Japanese Geotechnical Soc. Special Publ. 2015. 2, No. 78. P. 2671–2675. DOI:http://doi.org/10.3208/jgssp.TC301-04

- Golubov S. I., Vorobiev A. I., Sedlerova O. V., Yefimenko T. A. *Geological interpretation of remote sensing data for deep faults identifying in the Dnieper-Donets basin*. Publisher: European Association of Geoscientists & Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021. Vol. 2021. P. 1–6.
- 26. Groisman P., Lyalko V. I. (Eds.). Earth Systems Change over Eastern Europe. Kyiv: Akademperiodyka, 2012. 488 p.
- Kozlova A. A., Khyzhniak A. V., Piestova I. A., Andreiev A. A. Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for analysis of urban development and green spaces. European Association of Geoscientists & Engineers. Conference Proceedings, 17th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, May 2018. Vol. 2018. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801846
- Popov M. O., Stankevich S. A., Mosov S. P., Titarenko O. V., Topolnytskyi M. V., Dugin S. S., Landmine detection with UAV-based optical data fusion. IEEE EUROCON 2021 – 19th International Conference on Smart Technologies, 2021. P. 175–178. doi: 10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
- Popov M., Fedorovsky O. D., Stankevich S., Filipovich V. E., Khyzhniak A. V., Piestova I., Lubskyi M. S., Svideniuk M. Remote sensing technologies and geospatial modelling hierarchy for smart city support. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* 2017. P. 51–56. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-51-2017.
- Stankevich S., Piestova I., Shklyar S., Lysenko A. Satellite Dual-Polarization Radar Imagery Superresolution Under Physical Constraints. Eds N. Shakhovska, M. O. Medykovskyy. Advances in intelligent systems and computing IV. CSIT 2019. Adv. in Intelligent Systems and Computing. 2020. 1080. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_30.

REFERENCES

- 1. Burshtinska Kh. V., Stankevich S. A. (2010). *Aerocosmic surveying systems*. Text book. Lviv: Lviv Polytechnic, 246 p. [in Ukrainian].
- 2. DSTU 4220: 2003. Remote sensing of the Earth from space. Terms and definitions of concepts. Kyiv: State Standard of Ukraine [in Ukrainian].
- 3. DSTU 4758: 2007. Remote sensing of the Earth from space. Data processing. Terms and definitions of concepts. Kyiv: State Standard of Ukraine [in Ukrainian].
- 4. Dovgy S. O., Lyalko V. I. (Eds). (2001). *Informatization of aerospace agriculture*. Kyiv: Naukova Dumka, 606 p. [in Ukrainian].
- Dovgyi S. O., Lialko V. I., Babiichuk S. M., Kuchma T. L., Tomchenko O. V., Iurkiv L. Ya. (2019). Fundamentals of remote sensing: History and practice: Guidance Manual. translation from Ukrainian Savychenko O., Oleshko O. K.: Institute of Gifted Child of the NAPS of Ukraine. 316 p. ISBN 978-617-7734-05-4
- 6. Lyalko V. I., Fedorovsky O. D. (Eds) (1999). Ukraine from space (Atlas of decoded pictures of the territory of Ukraine from space vehicles). 2ed. Kyiv: Naukova Dumka, 34 p. [in Ukrainian].
- 7. Lyalko V. I., Fedorovsky O. D. (Eds). (2001). Cosmos Ukraine (Atlas of decoded pictures of the territory of Ukraine with spacecraft "Ocean" and other space vehicles). Kyiv: Naukova Dumka, 106 p. [in Ukrainian].
- 8. Lyalko V. I., Popov M. A. (Eds). (2004). *Reference book with remote sensing of the Earth*. Kyiv: SMP AVERS, 170 p. [in Ukrainian].
- 9. Lyalko V. I., Popov M. O. (Eds) (2006). *Multispectral methods for remote sensing of the Earth in the problems of nature management*. Kyiv: Naukova Dumka, 358 p. [in Ukrainian].
- 10. Lyalko V. I. (Ed.). (2010). Changes in terrestrial systems in Eastern Europe. Kyiv: Foliant publishing house, 581 p. [in Russian].
- 11. Lyalko V. I., Popov M. A. (Eds) (2012). Satellite methods of searching for minerals. Kyiv: Carbon-Ltd, 436 p. [in Russian].
- 12. Lyalko V. I. (Ed.) (2015). *Greenhouse effect and climate change in Ukraine: assessments and consequences*. Kyiv: Naukova Dumka, 283 p. [in Ukrainian].
- 13. Lyalko V. I., Popov M. O. (Eds). (2017). *Modern methods of remote search for minerals*. ISBN 978_966_02_8295_7 (electronic publication). Kyiv, 220 p. [in Ukrainian].
- Michak A. G., Filipovich V. E., Prikhodko V. L., et al. (2010). Aerocosmic studies of the geological environment. Sci. method. allowance. Kyiv: Ministry of Environmental Protection of Ukraine, State Geological Survey of Ukraine, 246 p. (in Ukrainian).
- 15. Popov M. A., Kudashev E. B. (Eds). (2013). *Infrastructure of satellite geoinformation resources and their integration*: Sat. sci. words. Kyiv: Carbon-Service, 192 p. [in Russian].
- 16. Apostolov A. A., Yelistratova L. A., Romanciuc I. F., Zakharchuk I. (2021). Identifying potential landslide areas by employing the erosion relief index and meteorological criteria in Ukraine. *Rev. Roum. Géogr. /Rom. J. Geogr.*, **65** (2), 125–141.
- Apostolov O. A., Elistratova L. O., Romanchuk I. F., Chekhniy V. M. (2020). Assessment of desertification areas in Ukraine by estimation of water indexes using remote sensing data. *Ukrainian Geograph. J.*, 1(109), 16–25. https://doi.org/10.15407/ ugz2020.01.016

- Arkhipov A. I., Glazunov N. M., Khyzhniak À. V. (2018). Heuristic criterion for class recognition by spectral brightness. *Cybern Syst Anal.*, 54, 94–98. https://doi.org/10.1007/s10559-018-0010-7
- 19. Artiushenko M. V., Khyzhniak A. V. (2020). Methodology of fire safety monitoring for peatlands using space survey. *J. Automat. and Inform. Sci.*, **52**, No. 7, 63–73. https://doi.org/10.1615/JAUTOMATINFSCIEN.V52.I7.60
- Azimov O. T., Trofymchuk O. M., Kuraeva I. V., Zlobina K. S., Karmazinenko S. P., Dorofey Ye. M. (2020). Ecological and geochemical study of the state of soil deposits in the impact areas of municipal solid waste landfills. 19th EAGE Intern. Conf. on Geoinformatics Theoretical and Applied Aspects (11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine): Conf. Proc., 2020, 1–7. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo133.
- Fedorovsky O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V. (2021). Assessing aquatic environment quality of the urban water bodies by system analysis methods based on integrating remote sensing data. *Space Science and Technology*, 27, No. 5, 10–18. https://doi.org/10.15407/knit2021.05.011.
- 22. Filipovich V., Mychak A., Krylova A. (2014). Use satellite data in monitoring ecological condition of urban landscape. 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. Albena, Bulgaria, Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Section Cartography and GIS. *Conference Proceedings*, vol. III, 1061–1068. https://doi.org/10.5593/ SGEM2014/B23/S11.134
- 23. Filipovych V. Ye., Shevchuk R. M., Mychak A. H. (2022). Satellite imagery application for searching buried intrusive structures. *Sci. innov.*, **18**(2), 59–65. https://doi.org/10.15407/scine18.02. 59
- Filipovych V. Ye., Lyalko V. I., Lischenko L. P., Pazynych N. V., Teremenko A. N., Krylova A. B. (2015). Remote sensing monitoring of historical centre of Kyiv for reducing risks from disasters at world heritages properties. J. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2(78), 2671–2675. http://doi.org/10.3208/jgssp.TC301-04
- Golubov S. I., Vorobiev A. I., Sedlerova O. V., Yefimenko T. A. (2021). Geological interpretation of remote sensing data for deep faults identifying in the Dnieper-Donets basin. Publisher: European Association of Geoscientists & Conference Proceedings, Geoinformatics, 2021, 1–6.
- 26. Groisman P., Lyalko V. I. (Eds.). (2012). Earth Systems Change over Eastern Europe. Kyiv: Akademperiodyka, 488 p.
- Kozlova A. A., Khyzhniak A. V., Piestova I. A., Andreiev A. A. (2018). Synergetic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for analysis of urban development and green spaces. European Association of Geoscientists & Engineers. 17th International Conference on Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, May 2018. *Conference Proceedings*, 2018, 1–6. DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801846
- Popov M. O., Stankevich S. A., Mosov S. P., Titarenko O. V., Topolnytskyi M. V., Dugin S. S. (2021). Landmine detection with UAV-based optical data fusion, IEEE EUROCON 2021 - 19th International Conference on Smart Technologies. 175–178. https://doi.org/10.1109/EUROCON52738.2021.9535553.
- Popov M., Fedorovsky O. D., Stankevich S., Filipovich V. E., Khyzhniak A. V., Piestova I., Lubskyi M. S., Svideniuk M. (2017). Remote sensing technologies and geospatial modelling hierarchy for smart city support. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 51–56. https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-W1-51-2017
- Stankevich S., Piestova I., Shklyar S., Lysenko A. (2020). Satellite dual-polarization radar imagery superresolution under physical constraints. Advances in intelligent systems and computing IV. Eds N. Shakhovska, M. O. Medykovskyy. CSIT 2019. Adv. in Intelligent Systems and Computing, 1080. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_30

Стаття надійшла до редакції	29.05.2022	Received 29.05.2022
Після доопрацювання	31.05.2022	Revised 31.05.2022
Прийнято до друку	31.05.2022	Accepted 31.05.2022

V. I. Lyalko, Chief Researcher, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr.Sci. in Geol. and Mineral., Professor
E-mail: vilyalko31@ukr. net *M. O. Popov*, Director, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr.Sci. in Tech., Professor
E-mail: mpopov@casre. kiev. ua *O. V. Sedlerova*, Deputy Director, Ph.D. in Geol., Senior Researcher
E-mail: sedlerovaolga@gmail. com *A. V. Khyzhniak*, Scientific Secretary, Researcher, Ph.D. in Tech.
E-mail: avsokolovska@gmail.com
State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth

of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine" 55-B, O. Gonchar Str., Kyiv, 01054 Ukraine

SCIENTIFIC CENTRE FOR AEROSPACE RESEARCH OF THE EARTH OF THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE: A 30-YEAR-OLD ROAD

The paper was prepared in connection with the 30th anniversary of the "State Institution Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth IGS NAS of Ukraine". The article briefly describes the history of the development of aerospace exploration of the Earth in Ukraine and the role of the Centre in remote sensing research provided by institutions of the National Academy of Sciences of Ukraine. The history of the Centre, its scientific academic schools, and main areas of research are presented, and the prospects for further development are outlined.

We describe the current organizational structure of the Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth and the achievements of the scientific team. The analysis of the contribution of its employees to the development of aerospace research in Ukraine and international activities of the Centre are presented. Further prospects and plans for the development of scientific research at the Centre, which cover the basic principles of the development of world society determined by the UN decisions on sustainable development, are considered.

Keywords: Scientific Centre, aerospace research, development strategy, sustainable development.

Космічна навігація та зв'язок

Space Navigation and Communications

https://doi.org/10.15407/knit2022.03.043 УДК 621.396

C. I. ПІЛЬТЯЙ¹, канд. техн. наук, доцент E-mail: s.piltiai@kpi.ua A. B. БУЛАШЕНКО¹, старш. викладач E-mail: a.bulashenko@kpi.ua A. B. ПОЛІЩУК¹, студент магістратури E-mail: animeshka177al@gmail.com O. B. БУЛАШЕНКО², студент E-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорского» Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

²Шосткінський професійний коледж імені Івана Кожедуба Сумського державного університету вул. Інститутська 1, Шостка, Сумська обл., Україна, 41100

ХВИЛЕВІДНИЙ НВЧ-ПОЛЯРИЗАТОР ДЛЯ АНТЕН СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ З КОЛОВОЮ ПОЛЯРИЗАЦІЄЮ

Обсяги інформації, що передаються в сучасних супутникових телекомунікаційних системах, постійно збільшуються. Антени із поляризаційним обробленням сигналів, яке виконують поляризатори, є базовими елементами таких систем. Отже, важливою задачею є розробка методів аналізу нових поляризаторів. Найбільш простими з технологічної точки зору є поляризатори на основі хвилеводів із діафрагмами. Задачами даного дослідження є аналіз та оптимізація електромагнітних характеристик поляризатора на основі квадратного хвилеводу із діафрагмами. Для розв'язання поставленої задачі оптимізації створено нову математичну модель, що дозволяє досліджувати вплив параметрів конструкції поляризатора на його електромагнітні характеристики. Математичну модель хвилевідного поляризатора із діафрагмами було створено методом декомпозиції із використанням хвильових матриць передачі та розсіювання. Крім того, нова математична модель враховує товщини діафрагм завдяки використанню їхніх еквівалентних Т- та П-подібних схем заміщення. Загальна хвильова матриця розсіювання є основою нової математичної моделі хвилевідного поляризатора. Цю матрицю було визначено за допомогою теорії мікрохвильових кіл. Основні характеристики хвилевідного поляризатора були визначені через елементи цієї матриці. У роботі здійснено оптимізацію характеристик поляризатора в Ки-діапазоні частот 10.7...12.8 ГГц. Розроблена нова математична модель хвилевідного поляризатора із діафрагмами дає можливість врахування висот діафрагм, відстаней між ними та їхні товщини. Нова математична модель є простішою та швидшою для визначення електромагнітних характеристик поляризатора порівняно з методом скінченних елементів, який часто використовується для аналізу мікрохвильових пристроїв різного призначення.

Ключові слова: поляризатор, хвилевід, діафрагма, матриця передачі, матриця розсіювання, диференційний фазовий зсув, коефіцієнт стійної хвилі за напругою, коефіцієнт еліптичності, кросполяризаційна розв'язка.

Цитування: Пільтяй С. І., Булашенко А. В., Поліщук А. В., Булашенко О. В. Хвилевідний НВЧ-поляризатор для антен супутникового зв'язку з коловою поляризацією. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 43—61. https:// doi.org/10.15407/knit2022.03.043

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28. № 3

вступ

Сьогодні супутникові телекомунікаційні системи широко використовують для вирішення різних складних технічних задач. До них належать мультиплексування каналів поляризації, підвищення ефективності мобільних супутникових систем, метеорологія, космічна інженерія та проблеми підвищення ефективності оброблення інформації [30]. Крім того, можна виділити деякі додаткові нагальні задачі, включаючи розробку сучасних електронних систем зондування та радіозв'язку, індикацію та усунення пасивних завад, створених опадами, для забезпечення безпеки польотів, оцінку інтенсивності опадів, вимірювання параметрів криги та снігових покривів, оцінка стану врожаю сільськогосподарських культур та багато іншого.

У багатьох сучасних галузях науки і техніки для вирішення перелічених задач широко використовують антенні системи з поляризаційною обробкою сигналів. У таких системах застосовують електромагнітні хвилі з ортогональними коловими або лінійними поляризаціями сигналів. Такий підхід покращує інформаційні характеристики та підвищує рівень прийнятого сигналу за несприятливих умов поширення радіохвиль [49, 54]. Просторове розділення каналів поляризації дозволяє поліпшити експлуатаційні характеристики телекомунікаційних систем для різних застосувань. Переваги, які забезпечують системи з ортогонально поляризованими хвилями [62], дозволяють збільшити ефективність та інформаційну здатність радіолокаційних та супутникових інформаційних систем.

Пристрої для перетворення типів поляризації та розділення сигналів з ортогональною поляризацією є важливими елементами антенних систем з поляризаційною обробкою сигналів. Основними типами широко поширених поляризаторів є хвилевідні поляризатори різних конструкцій. Наприклад, ребристі коаксіальні конструкції [8, 32, 50, 64—67, 69] та конструкції з діафрагмами [74—76] використовуються для створення широкосмугових мікрохвильових систем опромінення рефлекторних антенних систем.

СУЧАСНІ ХВИЛЕВІДНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ТА ЇХНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Серед сучасних мікрохвильових пристроїв для обробки поляризації сигналів назвемо нові поляризатори на основі однієї або двох секцій квадратного хвилеводу з діагонально розташованими ребрами та регульованою діафрагмою, розроблені в роботі [65]. Вони забезпечують 13 % пропускну здатність з коефіцієнтом еліптичності менше 1 дБ і зворотними втратами щонайменше 25 дБ. У роботі [66] було розроблено конструкцію поляризаторів на основі хвилевідних ділянок з двома діагонально розташованими ребрами. Односекційні поляризатори забезпечують відносну смугу пропускання від 12 до 17 %. У цьому випадку коефіцієнт еліптичності менший від 3 дБ, а коефіцієнт стоячої хвилі напруги (КСХН) — менший від 1.2. Двосекційні поляризатори з подібними секціями хвилеводу забезпечують 20 % відносної смуги пропускання. Їхній коефіцієнт еліптичності менший за 1 дБ, а КСХН < 1.15. Новий широкосмуговий когерентний ортомодний перетворювач на основі коаксіального чотиригранного хвилеводу для діапазону частот 3.4...5.4 ГГц був розроблений в роботі [51]. Він забезпечує коефіцієнт відбиття менше -24 дБ при кросполяризаційній розв'язці (КПР) понад 38 дБ. У роботі [52] автор запропонував конструкцію нової ефективної системи живлення для відбивних антен земних станцій з подвійною ортогональною круговою поляризацією. Запропонована конструкція включає поляризатор на основі хвилеводу з діафрагмами та ортомодний перетворювач на основі двореберного переходу. Ці пристрої були розроблені для супутникового С-діапазону частот 3.4... 4.8 ГГц. Значення КСХН є меншим від 1.14 дБ. Його кросполяризаційна розв'язка перевищує 30 дБ. У роботі [24] розроблено новий когерентний ортомодний перетворювач двох широкосмугових коаксіальних рупорних систем живлення рефлекторних антен з поляризаційною обробкою сигналу в діапазонах 3.4...4.2 ГГц та 10.7...12.8 ГГц. Він забезпечує кросполяризаційну ізоляцію понад 70 дБ з КСХН < 1.06. У роботі [15] автори розробили конструкції нового надширокосмугового ортомодового перетворювача та на його основі — двополяризовані чотириреберні рупорні антени. Ці перетворювачі та антени працюють в діапазоні частот 1...15 ГГц. У цьому діапазоні КСХН < 1.8. Ізоляція між двома портами з ортогональною лінійною поляризацією перевищує 40 дБ. У роботі [33] описано нову конструкцію широкосмугового коаксіального поляризатора для супутникового С-діапазону частот від 3.4 до 4.8 ГГц. Розроблений поляризатор забезпечує диференціальний фазовий зсув $90^{\circ}\pm 2.5^{\circ}$ з коефіцієнтом відбиття менше 33 дБ. Кросполяризаційна розв'язка перевищує 33 дБ. Розроблений поляризатор може застосовуватися у двосмугових антенах для супутникових телекомунікаційних систем. Дослідження [32] також присвячене розробці та оптимізації широкосмугових ребристих коаксіальних хвилевідних поляризаторів. Автори показали, що для проєктування оптимальних широкосмугових коаксіальних хвилевідних поляризаторів необхідно застосовувати закон гармонічного розподілу для ширини зазорів між симетрично розташованими ребрами.

У роботах [18, 19] автори розробили нову математичну модель секторних коаксіально-ребристих хвилеводів. Такі хвилеводи є основними елементами нових двосмугових пристроїв обробки поляризації. Математичні моделі, розроблені в роботах [18, 19], базуються на методі інтегральних рівнянь. Отримані максимальні співвідношення частот зрізу двох найнижчих мод секторних коаксіально-ребристих хвилеводів. Дослідження [20, 61] представляють результати розробки чисельного алгоритму аналізу та оптимізації широкосмугових поляризаторів, які складаються з симетрично розташованих зубчастих прямокутних гребенів у коаксіальному хвилеводі. Автори дослідили фактори, що впливають на точність та надійність отриманих чисельних результатів. Роботи [21-23] присвячено аналізу характеристик власних режимів коаксіальних чотиригранних хвилеводів, на основі яких розроблено двосмугові коаксіальні ортомодні перетворювачі. Проведено аналіз мод коаксіальних чотиригранних хвилеводів та оцінку потенційно досяжного коефіцієнта пропускної здатності таких хвилеводів.

Наукові дослідження [16, 17, 55] присвячені результатам розробки математичної моделі коаксіально-ребристих хвилеводів. На основі таких хвилеводів можна створити нові хвилевідні поляризатори. Аналіз проводиться за допомогою методу інтегральних рівнянь. В результаті були отримані максимальні співвідношення частот зрізу двох найнижчих мод секторних коаксіально-ребристих хвилеводів. Істотними недоліками поляризаторів на основі ребристих коаксіальних хвилеводів з гребінками є відносна складність їхнього виготовлення, великі габаритні розміри та підвищений ризик пробою в області зазору між ребром і циліндричною стінкою хвилеводу.

У роботі [74] розроблено новий метод аналізу широкосмугових хвилевідних поляризаторів. Цей метод безпосередньо дає геометрію пристрою без використання методів оптимізації, щоб уникнути проблем з локальними мінімумами. Для випробування цього методу були розроблені хвилевідні поляризатори з діафрагмами в кругових та квадратних хвилеводах із шириною 10 % у Ка-діапазоні частот з КПР < 50 дБ. У роботі [75] пропонується нова конструкція профілю діафрагм для поляризаторів на основі кругового хвилеводу. Цей підхід дає можливість вибрати оптимальний набір діафрагм, що забезпечують мінімальне відхилення диференціального фазового зсуву від середнього значення в робочій смузі частот. Такий поляризатор у Ка-діапазоні частот з відносною смугою пропускання 10 % забезпечує втрати 55 дБ. Наукові дослідження [76] містять результати розробки хвилевідного поляризатора для системи живлення антени у супутниковому С-діапазоні. При відносній смузі пропускання 30 % розроблений пристрій забезпечує кросполяризаційну розв'язку 35 дБ з коефіцієнтом відбиття -40 дБ.

У роботі [11] розробляється дизайн компактного хвилевідного поляризатора з режимом вищого порядку. Він складається з трикутної металевої пластини для перетворення режимів та перетворювача лінійної поляризації з круглих металевих штирів. Поляризатор працює в діапазоні частот 3.28...3.72 ГГц з коефіцієнтом еліптичності нижче 3 дБ. Запропонована конструкція використовується у бортових космічних системах. У роботі [5] пропонується конструкція двосмугового поляризатора на основі інтегрованого хвилеводу К/Ка-діапазону частот. Ізоляція між приймальним та передавальним каналами становить більше ніж 35 дБ, а втрати на введення не перевищують 1.5 дБ. У роботі [31] запропонували вигнутий дизайн поляризатора. Він використовується для зміни поляризації в супермодових хвилеводах. Такий компонент використовується у потужних широкосмугових радіолокаційних давачах W-діапазону, які застосовуються для контролю космічного сміття. Дизайн був розроблений в діапазоні частот від 90 до 100 ГГц. Кросполяризаційна розв'язка становить менше -26 дБ. У роботі [29] пропонується розроблена широкосмугова циркулярно-поляризована магнітоелектрична дипольна антенна решітка для зв'язку у 5G-комунікаціях при умові, що коефіцієнт еліптичності становитиме менш ніж 3 дБ при 27.8 % відносної смуги пропускання (23.2...30.8 ГГц).

У роботі [46] запропоновано конструкцію нової циліндричної рупорної антени з лівою круглою поляризацією для W-діапазону. Така антена має вбудовану поляризаційну структуру. Внутрішня поляризаційна структура складається з дев'яти пар кругових порожнин для формування циркулярно поляризованої хвилі. Антена має добрий збіг імпедансу ($S_{11} \le -15$ дБ) та значення коефіцієнта еліптичності менше від 1.2 дБ у діапазоні робочих частот від 79.5 до 88 ГГц. У роботі [79] представлено нову конструкцію хвилевідного фазообертача, що має постійний зсув фази у широкому діапазоні частот. Фазообертач забезпечує хороші показники пропускної здатності на 82 % завдяки низьким втратам вставки та відхилення диференціального фазового зсуву. У роботі [53] пропонується конструкція регульованого фазообертача Ки-діапазону. Налаштування здійснюється завдяки парі регульованих металевих штирів. Конструкція виконується у вигляді хвилеводу і не вимагає додаткових переходів до площинних структур. Пропоновану конструкцію можна використати у фазованих антенних решітках.

Для аналізу хвилевідних структур сучасних приладів обробки поляризації використовуються різні аналітичні та чисельні методи. Основні серед них: метод узгодження режимів [27, 63], метод часткових областей з прямим узгодженням полів [20, 61, 70], метод інтегральних рівнянь для магнітного поля [71], метод інтегральних рівнянь [56, 69], який враховує особливість поля на ребрах і виключає відносність збіжності рядів у методі часткових областей [4], а також метод узагальнених матриць розсіяння [37].

Ключовим недоліком усіх цих методів є складність розрахунку повної структури електромагнітних полів. Отже, новий простіший метод аналізу буде більш швидким та ефективним. Цей метод повинен використовувати аналіз мікрохвильових кіл на основі матриць розсіювання та передачі. Такі методи дозволяють аналізувати різні мікрохвильові фільтри [3, 35, 36, 48, 68, 72] та фазозсувачі [38—42, 44, 47, 53, 60, 79], які використовуються в сучасних фазованих антенних решітках [6, 7, 10] для формування променя. Крім того, такі методи враховують взаємодію вищих типів хвиль без безпосереднього застосування чисельної оптимізації спеціалізованих комп'ютерних програм. Такі методи використовуються для розробки хвилевідних поляризаторів зі штирями та діафрагмами.

У роботах [9, 57] розроблено нову методику аналізу електромагнітних характеристик хвилевідних поляризаторів з діафрагмами. За її допомогою були створені компактні поляризатори на основі квадратного хвилеводу з діафрагмами для Ки-діапазону частот 10.7...12.8 ГГц [58, 59]. Хвилевідний поляризатор з трьома діафрагмами забезпечує диференціальний фазовий зсув на 90° ± 4.0° з КСХН < 2.03 та КПР > 29 дБ. Хвилевідний поляризатор з чотирма діафрагмами забезпечує диференціальний фазовий зсув на 90° ± 3.5° з КСХН < 1.24 та КПР > 30.3 дБ. Робота [57] містить результати розробки хвилевідного поляризатора, що працює в С-діапазоні частот 3.4...4.2 ГГц. Хвилевідний поляризатор з чотирма діафрагмами забезпечує диференціальний фазовий зсув на 90° ± 3.4° з КСХН < 1.36 та КПР > 30 дБ.

Більшість наукових статей, що розглядають поляризатори [1, 2, 5, 11, 13, 24—26, 14, 31, 39, 41, 43, 52, 73, 75—78], містять лише результати

комп'ютерного моделювання, яке є громіздким і вимагає багато часу на оптимізацію. У роботі [40] було запропоновано компактний хвилевідний обертач площини поляризації, який обертає площину поляризації на довільний кут. Конструкція містить чотири щілинні плоскі діафрагми у прямокутному хвилеводі, який має смугу пропускання близько 2 %. У роботі [39] представлено конструкцію та характеристики компактного широкосмугового тривимірного друкованого поляризатора на основі хвилеводу в Ка-діапазоні 28...34 ГГц. Конструкція складається з пари радіально протилежних канавок усередині кругового хвилеводу, які збуджуються коаксіальним зондом. Такий поляризатор забезпечує коефіцієнт еліптичності, який перевищує 3 дБ в смузі пропускання. У роботах [38, 41-42] розглядається конструкція обертачів площини поляризації на 90° у вигляді щілин зі смугою пропускання 5 %. Дослідження [73] містить експериментальне порівняння двох типів прямокутних хвилевідних поляризаторів, які використовуються в Ка-діапазоні частот у гіроскопах.

Широко застосовуються поляризатори з тонкими металевими перегородками [13, 14, 25, 26, 34, 80]. У роботі [13] описано новий широкосмуговий поляризатор з перегородкою, що забезпечує відносну пропускну здатність 37.8 % при коефіцієнті еліптичності менше 1.3 дБ. Наукові дослідження [34] вивчають особливості розробленої САПР компактних поляризаторів з перегородкою на основі круглих та прямокутних хвилеводів. У роботі [80] пропонується конструкція нового хвилевідного поляризатора з перегородкою. Поляризатор розроблено для діапазону частот від 8.6 до 9.5 ГГц. Перегородка складається з конічного щілинного колектора енергії у квадратній частині хвилеводу і щілинного випромінювача на спільному боці двох прямокутних хвилевідних систем живлення. Запропонована конструкція має хороші показники у зворотних втратах, втратах вставки та різниці фаз. В іншому дослідженні [25] показано можливість оптимізації поляризаторів з перегородкою постійної товщини для різних відносних смуг пропускання від 5 до 20 %. Проведено експериментальне дослідження прототипів для поляризаторів О- і К-діапазону частот. У роботах [14, 26] було розроблено компактний поляризатор з перегородкою Х-діапазону частот. У діапазоні робочих частот 7.7...8.5 ГГц цей поляризатор забезпечує диференціальний фазовий зсув від 83° до 100°, його коефіцієнт стоячої хвилі напруги <1.4, кросполяризаційній розв'язці КПР > 30 дБ.

Наукові дослідження [13, 14, 25, 26, 57—59] присвячені останнім розробкам пристроїв обробки поляризації кафедри теоретичних основ радіотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». В них було продемонстровано, що хвилевідні поляризатори з діафрагмами конструктивно прості у виготовленні і забезпечують відносно широкі смуги частот.

На нашу думку, є нагальна проблема у створенні нових типів хвилевідних поляризаторів з діафрагмами. Для вирішення цієї проблеми потрібно розробити нову математичну модель, яка б дозволила ефективно аналізувати та оптимізувати нові структури широкосмугових хвилевідних поляризаторів. Нова модель повинна враховувати товщину діафрагм поляризатора, що значно покращило б точність визначення електромагнітних характеристик і не вимагало б великої кількості часу розрахунку.

ВНУТРІШНЯ СТРУКТУРА ХВИЛЕВІДНОГО ПОЛЯРИЗАТОРА З ДВОМА ДІАФРАГМАМИ ТА ЙОГО МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ

Типова конструкція запропонованого для моделювання поляризатора складається з квадратного або кругового хвилеводу та декількох провідних діафрагм у ньому. Внутрішню структуру поляризатора показано на рис. 1. Для конструкції поляризатора було обрано квадратний хвилевід, оскільки його одномодова робоча смуга частот ширша, ніж відповідна смуга кругового хвилеводу. У цьому випадку режими вищого порядку мають менший вплив на характеристики розробленого поляризатора.

Для розробки параметричної математичної моделі хвилевідного поляризатора із діафрагмами ми ввели позначення всіх його розмірів: висота та ширина використаного квадратного хвилеводу однакові і позначаються як *а*. Крім



Рис. 1. Внутрішня структура квадратного хвилевідного поляризатора з двома діафрагмами



Рис. 2. Еквівалентна схема квадратного хвилевідного поляризатора з двома діафрагмами

того, внутрішня структура містить дві діафрагми однакових розмірів. Висоти обох діафрагм позначаються як h. Літера w означає товщину діафрагм. Відстань між двома діафрагмами позначено літерою *l*.

На основі теорії мікрохвильових кіл [12] на рис. 2 ми представили розглянуту конструкцію хвилевідного поляризатора з діафрагмами з використанням загальної еквівалентної мережі. Це подання містить матриці передачі елементів структури, за якими структура була фактично розділена.

Для теоретичного аналізу ми розділимо запропоновану еквівалентну схему, показану на рис. 2, на окремі 4-полюсні схеми. Два з них з'єднані паралельно реактивними елементами, а другий є ділянкою звичайної лінії електропередачі [12]. Кожна з представлених 4-термінальних мереж характеризується власною матрицею передачі хвиль:

$$\begin{bmatrix} T_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix},$$
$$\begin{bmatrix} T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{j\theta} & 0 \\ 0 & e^{-j\theta} \end{bmatrix},$$

де θ — електрична довжина ділянки еквівалентної регулярної лінії електропередачі довжиною І.

Електрична довжина виражається із використанням відношення довжини *l* до довжини хвилі у використаній лінії передачі або хвилеводі:

$$\theta = \frac{2\pi l}{\lambda_g},$$

де λ_g — довжина хвилі у хвилеводі. Довжина хвилі у провіднику визначається добре відома з електромагнітної теорії формулою [12]

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{\tilde{n}}}\right)^2}},$$

де λ_0 — довжина хвилі у вільному просторі, $\lambda_{\tilde{n}}$ критична довжина хвилі у квадратному хвилеводі, на якій базується поляризатор.

Повна матриця передачі хвилі поляризатора хвилеводу визначається як добуток матриць передачі її елементів:

$$\begin{bmatrix} T_{\Sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11\Sigma} & T_{12\Sigma} \\ T_{21\Sigma} & T_{22\Sigma} \end{bmatrix}$$

Далі елементи загальної матриці розсіяння поляризатора виражаються на основі елементів отриманої матриці передачі:

$$\begin{bmatrix} S_{\Sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11\Sigma} & S_{12\Sigma} \\ S_{21\Sigma} & S_{22\Sigma} \end{bmatrix} = \frac{1}{T_{11\Sigma}} \begin{bmatrix} T_{21\Sigma} & |T| \\ 1 & -T_{12\Sigma} \end{bmatrix},$$

де |T| — визначник загальної хвильової матриці передачі поляризатора.

Виразимо елементи матриці розсіювання в явному вигляді на основі попередньої формули зв'язку з елементами матриці передачі:

$$S_{11\Sigma} = \frac{T_{21\Sigma}}{T_{11\Sigma}} = \frac{T_{11}T_{21}e^{j\theta} + T_{21}T_{22}e^{-j\theta}}{T_{11}^{2}e^{j\theta} + T_{12}T_{21}e^{-j\theta}},$$

$$S_{21\Sigma} = \frac{1}{T_{11\Sigma}} = \frac{1}{T_{11}^{2}e^{j\theta} + T_{12}T_{21}e^{-j\theta}}.$$

Просту еквівалентну схему квадратного хвилеводу з двома індуктивними діафрагмами пока-



зано на рис. 3, *a*. У цьому випадку еквівалентні індуктивності підключаються до лінії електропередачі паралельно. З фізичної точки зору така ситуація має місце, коли основний режим TE01 з горизонтальною поляризацією поширюється через структуру поляризатора від його входу до виходу.

Для більш точного математичного аналізу характеристик поляризатора для горизонтальної поляризації ми застосуємо більш вдосконалену Т-подібну еквівалентну схему кожної індуктивної діафрагми (рис. 3, δ). Це дозволяє врахувати вплив товщини діафрагми в одномодовому хвилеводі. Усі реактивності еквівалентного Т-подібного контуру (рис. 3, δ) індуктивної діафрагми були отримані у роботі [45, C. 255]:

$$X_{a} = \frac{2a}{\lambda_{g}} \cdot \left(\frac{a}{\pi \cdot D_{1}}\right)^{2},$$
$$X_{b} = \frac{a}{8\lambda_{g}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{2}}{a}\right)^{4},$$

де *а* — поперечний розмір квадратних стінок хвилеводу (або широкої стінки у випадку прямокутної напрямної), *w* і *h* — товщина і висота

діафрагм,

$$D_{1} = \frac{2h}{\sqrt{2}} \cdot \left[1 + \frac{w}{\pi \cdot 2h} \ln\left(\frac{4\pi \cdot 2h}{e \cdot w}\right) \right],$$
$$D_{2} = \sqrt[4]{\frac{4}{3\pi}} w \cdot \left(2h\right)^{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot D_{2}}{a}\right)^{4}.$$

Для визначення всіх елементів матриці хвильової передачі розглянутої еквівалентної мережі ми застосовуємо відомі формули з'єднання T- та Z-матриць [28, C. 34]:

$$\begin{split} T_{11} &= \frac{Z_2(Z_1+1) + (Z_3+1)(Z_1+Z_2+1)}{2Z_2}, \\ T_{12} &= \frac{(1-Z_3)(Z_1+Z_2+1) - Z_2(Z_1+1)}{2Z_2}, \\ T_{21} &= \frac{Z_2(Z_1-1) + (Z_3+1)(Z_1+Z_3-1)}{2Z_2}, \\ T_{22} &= \frac{1+T_{12}T_{21}}{T_{11}}. \end{split}$$

Просту еквівалентну схему квадратного хвилеводу з двома ємнісними діафрагмами показано на рис. 4, *а*. У цьому випадку еквівалентні ємності з'єднуються з еквівалентною лінією передачі паралельно. З фізичної точки зору така ситуація виникає, коли основний режим TE₁₀ з типом вертикальної поляризації поширюється через структуру поляризатора від його входу до виходу.

З метою більш точного математичного аналізу характеристик поляризатора у випадку вертикальної поляризації ми застосуємо вдосконалену П-подібну еквівалентну схему кожної ємнісної діафрагми. Таку схему показано на рис. 4, *б*. Вона дозволяє врахувати вплив товщини ємнісної діафрагми в одномодовому квадратному хвилеводі. Усі формули провідності еквівалентної П-подібної схеми (рис. 4, *б*) ємнісної діафрагми отримано в роботі [45, C. 251]:

$$B_{a} = B_{1} + \frac{b}{d} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi \cdot w}{\lambda_{g}}\right),$$

$$B_{b} = \frac{b}{d} \cdot \operatorname{csc}\left(\frac{2\pi \cdot w}{\lambda_{g}}\right),$$

$$B_{1} = \frac{b}{\lambda_{g}} \cdot \left[\left(\frac{\pi \cdot 2h}{2b} \cdot g\right) + \frac{1}{6}\left(\frac{\pi \cdot 2h}{2b} \cdot g\right) - \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2h}{b} \cdot \frac{w}{d} + \frac{3}{2}\left(\frac{b}{\lambda_{g}}\right)^{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2h}{2b}\right)^{4}\right],$$

$$g = 1 + \frac{w}{\pi \cdot 2h} \cdot \ln\left(\frac{4\pi}{e} + \frac{2h}{w}\right),$$

де b — поперечний розмір вузької стінки у випадку прямокутного хвилеводу, w — товщина діафрагм, h — висота діафрагм. Для застосованого в поляризаторі квадратного хвилеводу слід використовувати b = a.

Для того щоб отримати всі елементи хвильової матриці передачі розглянутої П-подібної еквівалентної мережі, ми використовуємо відомі формули з'єднання Т- та Z-матриць [28, C. 35]:

$$\begin{split} T_{11} = & \frac{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 (Z_2 + Z_3) + Z_3 (Z_1 + Z_2) + (Z_1 + Z_2 + Z_3)}{2 Z_1 Z_3}, \\ & T_{12} = \frac{(1 - Z_3) (Z_1 + Z_2 + 1) - Z_2 (Z_1 + 1)}{2 Z_2}, \\ & T_{21} = \frac{Z_2 (Z_1 - 1) + (Z_3 + 1) (Z_1 + Z_3 - 1)}{2 Z_2}, \end{split}$$

$$T_{22} = \frac{1 + T_{12}T_{21}}{T_{11}}$$

Отже, ми отримали всі елементи окремих матриць передачі для основних режимів як горизонтальної, так і вертикальної поляризацій. Далі ми підставляємо їх у формулу добутку матриць передачі. Використовуючи формули зв'язку загальних матриць пропускання та розсіювання, знаходимо всі S-параметри хвилевідного поляризатора. Всі електромагнітні характеристики хвилевідного поляризатора з діафрагмами визначаються на основі залежностей елементів його загальної S-матриці від частоти.

Введений поляризатором диференціальний фазовий зсув на його виході визначається наступним чином:

$$\Delta \phi = \phi_L - \phi_C = \arg(S_{21\Sigma L}) - \arg(S_{21\Sigma C}),$$

де $S_{21\Sigma L}$ та $S_{21\Sigma N}$ — елементи загальної матриці розсіювання у випадках індуктивної та ємнісної діафрагм відповідно.

Для обох поляризацій коефіцієнт КСХН поляризатора визначається з використанням величини коефіцієнта відбиття (параметр S_{11}) з виразу

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|}.$$

Коефіцієнт еліптичності поляризаційного стану електромагнітної хвилі на виході поляризатора визначається (у шкалі дБ) формулою

$$r = 10 \lg \frac{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2 B^2 \cos(2\Delta \phi)}}{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2 B^2 \cos(2\Delta \phi)}},$$

де $A = |S_{21\Sigma L}|$, $B = |S_{21\Sigma C}|$ — коефіцієнти передачі у випадках індуктивної та ємнісної діафрагм відповідно.

Кросполяризаційну розв'язку (КПР) поляризатора можна визначити (у шкалі дБ) на основі коефіцієнта еліптичності:

$$XPD = 20 \lg \left(\frac{10^{0.05r} + 1}{10^{0.05r} - 1} \right).$$

Таким чином, ми розробили математичну модель усіх електромагнітних характеристик хвилевідного поляризатора, включаючи параметри узгодження, фази та поляризації. Нижче

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28. № 3

ми використаємо створену модель для розробки та оптимізації хвилевідного поляризатора з діафрагмами для діючого супутника Ки-діапазону 10.7...12.8 ГГц.

РОЗРОБКА ХВИЛЕВІДНОГО ПОЛЯРИЗАТОРА ДЛЯ КU-ДІАПАЗОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТВОРЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Використаємо розроблену математичну модель хвилевідного поляризатора для параметричної оптимізації його продуктивності на робочій частоті діапазону Ки 10.7...12.8 ГГц. Оптимізація здійснюється шляхом зміни геометричних параметрів структури поляризатора. Змінюючи висоту діафрагм h, ми досягаємо необхідного диференціального фазового зсуву близько 90°. Крім того, регулюючи відстань *l* між діафрагмами, ми отримуємо оптимальне узгодження структури поляризатора. Крім того, додаткова корекція частотних характеристик забезпечується початковим вибором фіксованої товщини діафрагми, яка також оптимізована параметрично. Одночасна зміна всіх геометричних параметрів поляризатора дозволяє отримати покращене узгодження з невеликим відхиленням введеного диференціального фазового зсуву від необхідних 90°.

Основні електромагнітні характеристики оптимізованого поляризатора продемонстрова-

но на рис. 5 і 6. На рис. 5, *а* показано залежність диференціального фазового зсуву поляризатора від частоти. Видно, що диференціальний фазовий зсув, який вводиться оптимальною конструкцією хвилевідного поляризатора з двома діафрагмами, лежить у межах 90° \pm 5.2°. Частотна залежність диференціального фазового зсуву для оптимальної конструкції поляризатора з двома діафрагмами є практично лінійною.

Рис. 5, *б* демонструє КСХН оптимізованої конструкції квадратного хвилевідного поляризатора з двома діафрагмами. Видно, що у межах робочої частоти Ки-діапазону 10.7...12.8 ГГц максимальне значення КСХН для основних режимів обох поляризацій становить 2.15. Цей максимум досягається на найнижчій частоті 10.7 ГГц для режиму TE_{01} з горизонтальною поляризацією.

На рис. 5, δ ми бачимо, що КСХН для горизонтальної поляризації зменшується із збільшенням частоти, що вказує на покращення узгодження. З фізичної точки зору цей ефект пояснюється на основі еквівалентних схем, представлених на рис. 3. У випадку горизонтальної поляризації діафрагми еквівалентні індуктивностям (рис. 3, a) або Т-подібним еквівалентним схемам (рис. 3, δ). На нижчих частотах робочого діапазону Ки ці мережі працюють подібно до елементів ко-



Рис. 5. Залежність від частоти *f* в робочому Ки-діапазоні: *a* — диференціального фазового зсуву Δφ, *б* — значень КСХН (*1* — для горизонтальної поляризації, *2* — для вертикальної поляризації)



Рис. 6. Залежність від частоти f в робочому Ки-діапазоні: a — ко-ефіцієнта еліптичності r, δ — значень КПР

роткого замикання. Отже, хвилевідний поляризатор сильно відображає основний режим ТЕ₀₁ з горизонтальною поляризацією в районі найнижчої частоти робочої діапазону Ки-діапазону 10.7 ГГц. Зі збільшенням частоти покращується передача основного режиму ТЕ01 з горизонтальною поляризацією. Це також пояснюється за допомогою еквівалентних схем, представлених на рис. 3. Так, на рис. 3, б видно, що при вищих частотах ємності Т-подібні еквівалентні схеми можна замінити короткозамкненими провідниками, а індуктивності такої ж схеми еквівалентні розімкнутому колу. У цьому випадку Т-подібні схеми стали еквівалентними ділянці лінії електропередачі. Тому зі збільшенням частоти величина коефіцієнта відбиття наближається до нуля. Ефект подальшого збільшення КСХН після нульової точки пояснюється впливом режимів вищого порядку, які не враховуються еквівалентними мережами, продемонстрованими на рис. 3.

Крім того, на рис. 5, δ ми бачимо, що КСХН для основного режиму TE₁₀ з вертикальною поляризацією збільшується зі збільшенням частоти, що вказує на погіршення узгодження. Це явище можна пояснити розглядом еквівалентних схем, представлених на рис. 4. У випадку горизонтальної поляризації діафрагми еквівалентні ємностям (рис. 4, *a*) або еквівалентним схемам (рис. 4, δ). На нижчих частотах робочого діапазону Ku ці схеми працюють подібно до ділянки лінії електропередачі. Отже, хвилевідний поляризатор передає основний режим TE₁₀ з вертикальною поляризацією в районі найнижчої частоти робочого Ku- діапазону 10.7 ГГц. Зі збільшенням частоти передача основного режиму TE_{10} з вертикальною поляризацією погіршується. Це також пояснюється за допомогою еквівалентних схем рис. 4. Як видно із рис. 4, δ , при більш високих частотах ємності П-подібних еквівалентних схем можуть бути замінені короткозамкненим провідником, а індуктивності такої ж мережі еквівалентні розімкнутому колу. У цьому випадку П-подібні схеми стали еквівалентними елементам короткого замикання. Тому зі збільшенням частоти величина коефіцієнта відбиття для основної моди TE_{10} з вертикальною поляризацією наближається до нескінченності.

На рис. 6 приведено залежності коефіцієнта еліптичності r та кросполяризаційної розв'язки КПР від частоти для оптимізованої конструкції хвилевідного поляризатора з діафрагмами у межах робочої частоти Ки-діапазону f = 10.7...12.8 ГГц. Як видно із рис. 6, а, максимальне значення коефіцієнта еліптичності становить r == 1.5 дБ. Рис. 6, δ показує, що відповідне значення КПР перевищує 21.5 дБ. Представлені характеристики доводять, що неможливо отримати достатньо якісні характеристики коефіцієнта еліптичності та КПР, використовуючи лише дві діафрагми в конструкції хвилевідного поляризатора, оскільки у більшості сучасних супутникових інформаційних систем потрібно забезпечити кросполяризаційну розв'язку між сигналами з ортогональною круговою поляризацією понад 30 дБ.

Тому розглянута математична модель оптимізованого поляризатора на основі квадратного хвилеводу з двома діафрагмами в робочій Кидіапазоні 10.7...12.8 ГГц забезпечує помірні елек-



Рис. 7. Залежність електромагнітних характеристик поляризатора у випадку, коли геометричні параметри h, l та w змінюються на ± 1 % (фрагменти a-e) та ± 2 % (фрагменти $\partial - \infty$). Криві l відповідають зменшенню всіх розмірів на 1 % (2 %); криві 2 – оптимальним розмірам; криві 3 – збільшенню всіх розмірів на 1 % (2 %)



Рис. 8. Залежність від частоти *f* в робочому Ки-діапазоні: *a* — диференціального фазового зсуву Δφ, *б* — значень КСХН (*1* — для горизонтальної поляризації, *2* — для вертикальної поляризації)



Рис. 9. Залежність від частоти f в робочому Ки-діапазоні: а – коефіцієнта еліптичності r, б – значень КПР

тромагнітні характеристики. Значення КСХН для обох основних режимів з горизонтальною та вертикальною поляризаціями становить менше 2.15. Введений поляризатором диференціальний фазовий зсув становить $90^{\circ} \pm 5.0^{\circ}$. Коефіцієнт еліптичності менший від 1.5 дБ. Відповідне значення КПР перевищує 21.5 дБ. Одноразовий розрахунок поляризаційних характеристик за допомогою розробленої математичної моделі вимагає приблизно 40 с на заявленому для досліджень персональному комп'ютері. Цей час буде використано для подальшого порівняння двох чисельних методів. Головною перевагою розробленого квадратного хвилевідного поляризатора з двома діафрагмами є його компактність.

АНАЛІЗ ЧУТЛИВОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК ХВИЛЕВІДНОГО ПОЛЯРИЗАТОРА ДО ЗМІН ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

У цьому розділі ми проаналізуємо чутливість характеристик узгодження та поляризації розробленого оптимізованого хвилевідного поляризатора до зміни його геометричних параметрів. На рис. 7 представлено залежність електромагнітних характеристик від частоти у випадку, коли геометричні параметри h, l та w змінюються на ± 1 % та ± 2 %.

На рис. 7, *а*—г використано кілька загальних позначень: криві 1 відповідають зменшенню всіх розмірів на 1 %; криві 2 — оптимальним розмірам; криві 3— збільшенню всіх розмірів на 1 %. На рис. 7, $\partial - \omega$ ці ж позначення відповідають змінам всіх розмірів на ± 2 %. Видно (рис. 7, *a*, д), що максимальне відхилення диференціального фазового зсуву $\Delta \phi$ від 90° становить 5.5° для змін параметрів на ±1 % та 8.5° для змін параметрів на ±2 % відповідно. Максимальне значення КСХН (рис 7, б, е) збільшується до рівнів 2.25 та 2.5 відповідно. На рис. 7, в, є видно, що зменшення всіх розмірів на 1 % призводить до зменшення максимального рівня коефіцієнта еліптичності r з 1.5 до 1.3 дБ, а зменшення всіх розмірів на 2 % — з 1.5 до 1.4 дБ. Натомість збільшення всіх розмірів на 1 % призводить до збільшення коефіцієнта еліптичності від 1.5 до 1.7 дБ, а на 2 % — від 1.5 до 1.9 дБ.

Рис. 7, *е*, *ж* демонструють, що збільшення всіх розмірів на 1 % призводить до збільшення КПР від 21.5 до 21.6 дБ, а на 2 % — до зменшення КПР від 21.5 до 21.4 дБ. Зменшення всіх розмірів на 1 % призводить до зменшення КПР від 21.5 до 21.3 дБ, а на 2 % — до зменшення КПР з 21.5 до 19 дБ, що є найгіршим значенням КПР з усіх розглянутих у цьому розділі випадків.

РЕЗУЛЬТАТИ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНОГО ХВИЛЕВІДНОГО ПОЛЯРИЗАТОРА МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ

Для порівняння отриманих результатів ми змоделювали та оптимізували квадратний хвилевідний поляризатор з двома діафрагмами в Кидіапазоні частот 10.7...12.8 ГГц методом скінченних елементів у частотній області. Отримані чисельно результати представлено нижче у формі графіків.

На рис. 8, *а* приведено залежність диференціального фазового зсуву оптимізованого хвилевідного поляризатора від частоти. Видно, що максимальне відхилення диференціального фазового зсуву від 90° дорівнює 4.2°. Це відбувається на частоті 11.6 ГГц.

Рис. 8, *б* демонструє залежності КСХН від частоти в робочому Ки-діапазоні частот 10.7... 12.8 ГГц для основних режимів як горизонтальної, так і вертикальної поляризацій. Як видно, максимальне значення КСХН для обох поляризацій становить 3.26. Воно досягається на найвищій частоті робочого Ки-діапазону 12.8 ГГц.

Рис. 9 демонструє залежності коефіцієнта еліптичності та КПР від частоти. Видно, що максимальне значення коефіцієнта еліптичності становить 1.43 дБ, а імітований оптимальний КПР перевищує 21.7 дБ.

Отже, характеристики оптимізованого поляризатора на основі квадратного хвилеводу з двома діафрагмами, які моделювались методом скінченних елементів у частотній області, мають деякі відхилення від характеристик, отриманих розробленою математичною моделлю. В робочому діапазоні частот 10.7...12.8 ГГц КСХН для горизонтальної та вертикальної поляризацій становить менше 3.26. Диференціальний фазовий зсув, отриманий чисельно, становить 90° ± 4.2°. Коефіцієнт еліптичності оптимізованого поляризатора менший за 1.43 дБ. Відповідне значення КПР перевищує 21.7 дБ. Отримані результати вказують на те, що характеристики збігу та поляризації поляризатора є незадовільними для застосування в сучасних антенних системах. Для підвищення продуктивності хвилевідного поляризатора необхідно застосовувати більшу кількість діафрагм. Для чисельного моделювання була застосована адаптивна сітка з 120 000 тетраедричних комірок. Відповідний час розрахунку, необхідний для одного моделювання, становив приблизно 130 с на тому самому персональному комп'ютері, який раніше використовувався для тестування розробленої математичної моделі. Отже, розроблена математична модель більш ніж у три рази швидша для моделювання хвилевідних поляризаторів з діафрагмами, ніж метод скінченних елементів у частотній області.

ПОРІВНЯННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РОЗМІРІВ ТА ХАРАКТЕРИСТИК, ОТРИМАНИХ ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРОБЛЕНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ У ЧАСТОТНІЙ ОБЛАСТІ

Чисельні значення розмірів структурних елементів оптимізованого поляризатора на основі квадратного хвилеводу з двома діафрагмами в Ки-діапазоні від 10.7 до 12.8 ГГц наведено у табл. 1. Ці результати були отримані з використанням нової розробленої математичної моделі на основі техніки хвильових матриць та методу скінченних елементів у частотній області.

Як видно з табл. 1, оптимальні розміри квадратної стінки хвилеводу однакові для обох теоретичних методів. Ми можемо спостерігати невелику різницю розмірів діафрагм. Видно, що розроблена математична модель передбачає менші висоти та товщини діафрагм, ніж точніша чисельна техніка. Прогнозований розмір зазору виявився трохи меншим, ніж за результатами методу скінченних елементів у частотній області. Використовуючи ці спостереження, ми можемо створити модифікований гібридний підхід з корекціями розробленої моделі хвильових матриць для розробки хвилевідних поляризаторів з діафрагмами. Табл. 2 містить числові значення електромагнітних характеристик оптимальних конструкцій хвилевідних поляризаторів з двома діафрагмами для робочого Ки-діапазону. Поляризатори аналізували та оптимізували за допомогою двох згаданих вище методів.

Різницю розмірів та характеристик, отриманих двома різними методами, які спостерігаються в табл. 1 та 2, можна пояснити таким чином. Нова розроблена математична модель та метод скінченних елементів у частотній області використовують різні числові схеми. Крім того, представлена математична модель не враховувала вплив усіх вищих типів мод у хвилеводі. В результаті оптимізована структура поляризатора на основі представленої створеної математичної моделі передбачає кращі характеристики узгодження через невелике збільшення відхилення диференціального фазового зсуву від 90°. Розрахунок поляризаційних характеристик за допомогою нової розробленої математичної моделі вимагає утричі менше часу, ніж використання

Таблиця 1. Порівняння розмірів оптимізованих хвилевідних поляризаторів з двома діафрагмами, отриманими двома методами

Тип методу	а, мм	<i>h</i> ₁ , мм	<i>l</i> , мм	<i>w</i> , мм
Розроблена матема- тична модель на основі хвильових матриць	21.96	2.42	4.2	2.94
Метод скінченних елементів у частотній області	21.96	2.57	4.34	3.0

Таблиця 2. Порівняння оптимальних електромагнітних характеристик двох методів хвилевідного поляризатора з двома діафрагмами для Ки-діапазону

Тип методу	Макси- мальний КСХН	Δφ	<i>r</i> , дБ	КПР, дБ
Розроблена матема- тична модель на основі хвильових матриць	2.15	90° ± 5.0°	1.46	21.5
Метод скінченних елементів у частотній області	3.26	90° ± 4.2°	1.43	21.7

моделі, що базується на методі скінченних елементів. Під час процесу параметричної оптимізації потрібні сотні і тисячі таких розрахунків. Отже, переваги скорочення розрахунку часу за допомогою розробленої математичної моделі можуть становити декілька годин чи більше.

ВИСНОВКИ

Для багатьох сучасних радіотехнічних систем, які працюють у відносно вузьких робочих смугах частот, достатньо застосовувати прості поляризатори із незначною кількістю діафрагм. До того ж, результати застосування теоретичного методу доцільно спершу перевіряти для більш простих конструкцій. Хоча методи еквівалентних схем та хвильових матриць відомі, але їхнє застосування для розроблення саме хвилевідних поляризаторів і розрахунку їхніх поляризаційних характеристик у сучасних наукових статтях не висвітлено.

У роботі розроблено нову математичну модель поляризатора на основі квадратного хвилеводу з двома діафрагмами із використанням теорії мікрохвильових кіл. Основні електромагнітні характеристики було отримано за допомогою елементів загальної хвильової матриці розсіювання. Створена математична модель забезпечує чітке врахування впливу параметрів на електромагнітні характеристики хвилевідного поляризатора з діафрагмами. Запропонована модель дозволяє здійснити теоретичний аналіз та оптимізацію узгоджувальних та фазових характеристик поляризатора, включаючи частотні залежності коефіцієнта стійної хвилі за напругою, диференційного зсуву фаз, коефіцієнта еліптичності та кросполяризаційної розв'язки. Було встановлено, що для розрахунку поляризаційних характеристик за допомогою нової розробленої математичної моделі потрібно утричі менше часу, ніж при використанні моделі, що базується на методі скінченних елементів. Створену математичну модель можна широко застосовувати для розробки нових конструкцій поляризаторів та оптимізації наявних мікрохвильових пристроїв на основі хвилеводів з різною кількістю діафрагм.

Проведено параметричну оптимізацію поляризатора на основі квадратного хвилеводу з двома діафрагмами для отримання мінімального коефіцієнта стоячої хвилі за напругою для основних мод обох поляризацій. Крім того, одночасно вимагалися ефективні поляризаційні характеристики в робочому Ки-діапазоні частот 10.7...12.8 ГГц. Оптимізована конструкція хвилевідного поляризатора з діафрагмами забезпечує диференційний фазовий зсув 90° ± 4.2°. Коефіцієнт еліптичності розробленого поляризатора менший за 1.43 дБ. Відповідна кросполяризаційна розв'язка перевищує 21.7 дБ. Розроблений хвилевідний поляризатор можна використовувати у сучасних супутникових та радіолокаційних антенних системах різного призначення. Відмінність результатів, отриманих двома методами, вказує на необхідність подальшого вдосконалення запропонованого методу. Тим не менше, метод хвильових матриць рекомендується для початкової оцінки розмірів поляризаторів та швидкого визначення розмірів, які є близькими до оптимальних. Подальше уточнення характеристик та розмірів може виконуватися точнішими сітковими методами скінченних елементів або різниць. Подальші дослідження будуть зосереджені на розробці математичної моделі, яка враховуватиме більшу кількість мод вищих типів у хвилевідних поляризаторах із більшою кількістю діафрагм.

REFERENCES

- Addamo G., Peverini O. A., Manfredi D., Calignano F., Paonessa F., Virone G., Tascone R., Dassano G. (2018). Additive manufacturing of Ka-band dual-polarization waveguide components. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, 66, No. 8, 3589–3596. http://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2854187.
- Agnihotri I., Sharma S. K. (2019). Design of a compact 3D metal printed Ka-band waveguide polarizer. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18, No. 12, 2726–2730. http://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2950312.
- 3. Amari S. (2000). Synthesis of cross-coupled resonator filters using an analytical gradient-based optimization technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **48**, No. 9, 1559–1564. http://doi.org/10.1109/22.869008.
- 4. Amari S., Bornemann J., Vahldieck R. (1996). Application of a coupled-integral-equations technique to ridged waveguides. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, **44**, No. 12, 2256–2264. http://doi.org/10.1109/22.556454.
- Arnieri E., Greco F., Boccia L., Amendola G. (2020). A SIW-based polarization rotator with an application to linear-tocircular dual-band polarizers at K-/Ka-band. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 68, No. 5, 3730–3738. https://doi.org/10.1109/TAP.2020.2963901.
- Bulashenko A. V. (2020). Evaluation of D2D communications in 5G networks. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia*, 81, 21–29 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
- Bulashenko A. V. (2021). Combined criterion for the choice of routing based on D2D technology. *Radio Electronics, Computer Sci., Control*, 1, 7–13 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-1.
- Bulashenko A. V., Piltyay S. I. (2020). Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development. *Vis-nyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia*, 83, 17–28. https://doi.org/10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
- Bulashenko A., Piltyay S., Dikhtyaruk I., Bulashenko O. (2022). FDTD and wave matrix simulation of adjustable DBSband waeguide polarizer. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, 36, № 6, 875–891. https://doi.org/10.1080/09205071. 2021.1995897.
- Bulashenko A. V., Piltyay S. I., Kalinichenko Y. I., Zabegalov I. V. (2021). Waveguide polarizer for radar and satellite systems. *Visnyk NTUU KPI. Ser. Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia*, 86, 5–13 [in Russian]. https://doi.org/10.20535/ RADAP.2020.86.5-13.
- Chittora A., Yadav S. V. (2020). A compact circular waveguide polarizer with higher order mode excitation. *Proceedings of the IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies* (2–4 July 2020), Bangalore, India, 1–4. http://doi.org/10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
- 12. Collin R. E. (2001). Fondations for microwave engineering. New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 945 p.
- Deutschmann B., Jacob A.F. (2020). Broadband septum polarizer with triangular common port. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 68, No. 2, 693–700. http://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2951138.
- Dubrovka F., Martunyuk S., Dubrovka R., Lytvyn M., Lytvyn S., Ovsianyk Yu., Piltyay S., Sushko O., Zakharchenko O. (2020). Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station. *Proceedings of IEEE Ukrainian Microwave Week*, (21–25 September 2020), Kharkiv, 196–202. http://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.

- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2011). A high performance ultrawideband orthomode transducer and a dual-polarized quadridged horn antenna based on it. *Proceedings of VIII IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques* (20– 23 September 2011), Kyiv, 176–178. http://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170737.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2012). Eigenmodes of sectoral coaxial ridged waveguides. *Radioelectronics and Communications* Systems, 55, No. 6, 239–247. http://doi.org/10.3103/S0735272712060015.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2012). Electrodynamics boundary problem solution for sectoral coaxial ridged waveguide by integral equation technique. *Radioelectronics and Communications Systems*, 55, No. 5, 191–203. http://doi.org/10.3103/ S0735272712050019.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2012). Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides. *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv–Slavske, Ukraine, 191.
- 19. Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2013). A novel wideband coaxial polarizer. *Proceedings of IX International Conference on Antenna Theory and Techniques* (16–20 September 2013), Odessa, 473–474. https://doi.org/10.1109/ICATT.2013.6650816.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2013). Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Results, *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radioteknika Radioaparatobuduvannia*, 55, 13–23. http://doi. org/10.20535/RADAP.2013.55.13-23.
- Dubrovka F.F., Piltyay S.I. (2014). Boundary problem solution for eigenmodes in coaxial quad-ridged waveguides. *Information and Telecommunication Sciences*, 5, No. 1, 48–61. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Telnau_2014_1_1_10.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2014). Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. *Theory, Radioelectronics and Communications Systems*, 57, No. 1, 1–30. https://doi.org/10.3103/S0735272714010014.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2014). Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical results. *Radioelectronics and Comm. Systems*, 57, No. 2, 59–69. https://doi.org/10.3103/S0735272714020010.
- Dubrovka F. F., Piltyay S. I. (2017). Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds. *Proceedings of XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques* (24–27 May 2017), Kyiv, 277–280. https://doi.org/10.1109/ICATT.2017.7972642.
- 25. Dubrovka F. F., Piltyay S. I., Dubrovka R R., Lytvyn M. M., Lytvyn S. M. (2020). Optimum septum polarizer design for various fractional bandwidths. *Radioelectron. Commun. Syst.*, **63**, No. 1, 15–23. http://doi.org/10.3103/S0735272720010021.
- Dubrovka F., Piltyay S., Sushko O., Dubrovka R., Lytvyn M., Lytvyn S. (2020). Compact X-band stepped-thickness septum polarizer. *Proceedings of IEEE Ukrainian Microwave Week* (21–25 September 2020). Kharkiv, 135–138. http://doi. org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
- Eleftheriades G. V., Omar A. S., Katehi L. P. B., Rebeiz G. M. (1994). Some important properties of waveguide junction generalized scattering matrices in the context of the mode matching technique. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 42, No. 10, 1896–1903. http://doi.org/10.1109/22.320771.
- 28. Feldshtein A. L., Yavich L. R., Smirnov V. P. (1967). *Spravochnik po jelementam volnovodnoj tehniki*. Moscow: Sov. radio, 652 p. [in Russian].
- Feng B., Lai J., Chung K. L., Chen T.-Y., Liu Y., Sim C.-Y.-D. (2020). A compact wideband circularly polarized magnetoelectric dipole antenna array for 5G millimeter-wave applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68, No 9, 6838–6843. http://doi.org/10.1109/TAP.2020.2980368.
- 30. Gao S., Luo Q., Zhu F. (2014). Circularly Polarized Antennas. Chichester, USA: John Wiley and Sons, 322 p.
- 31. Haas D., Marek A., Thumm M., Jelonnek J., Jirousek M., Peichl M. (2020). Broadband polarizer miter bend for high-power radar applications. *Proceeding of the German Microwave Conference* (9–11 March 2020). Germany, Cottbus.
- Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Prikolotin S. A., Rud L. A., Steshenko S. A. (2013). Design and optimization of broadband ridged coaxial waveguide polarizers. *Proceedings of International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves* (23–28 June 2013). Kharkov, 445–447. http://doi.org/10.1109/MSMW.2013.6622082.
- Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Prikolotin S. A., Rud L. A., Steshenko S. A. (2013). Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers. *Proceedings of IX International Conference on Antenna Theory and Techniques* (16–20 September 2013), Odessa, 470–472. https://doi.org/10.1109/ICATT.2013.6650815.
- Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Rud L. A., Tkachenko V. I., Herscovici M. (2004). Compact septum polarizers with a circular output waveguide, *Proceedings of V IEEE International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves* (21–26 June 2004). Kharkov, 686–688. http://doi.org/10.1109/MSMW.2004.1346088.
- Kirilenko A., Mospan L., Tkachenko V. (2002). Capacitive iris bandpass filters with spurious harmonic modes suppression. *Proceedings of International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory* (10–13 September 2002). Kyiv, 284–287. http://doi.org/10.1109/MMET.2002.1106997.

- 36. Kirilenko A., Rud L., Tkachenko V., Kulik D. (2002). Evanescent-mode ridged waveguide bandpass filters with improved performance. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50, No. 5, 1324–1327. http://doi.org/10.1109/22.9991468.
- Kirilenko A. A., Senkevich S. L., Steshenko S. O. (2015). Application of the generalized scattering matrix technique for the dispersion analysis of 3D slow-wave structures. *Telecommunications and Radio Engineering*, 74, No. 17, 1497–1511. http:// doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v74.i17.10.
- Kirilenko A. A., Steshenko S. O., Derkach V. N., Ostrizhnyi Y. M. (2018). Comparative analysis of tunable compact rotators. J. Electromagnetic Waves and Applications Microwaves Antennas and Propagatio, 33, 304—319. http://doi.org/10.10 80/09205071.2018.1550443.
- Kirilenko A. A., Steshenko S. O., Derkach V. N., Ostryzhnyi Y. M. (2019). A tunable compact polarizer in a circular waveguide. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 67, No. 2, 592–596. http://doi.org/10.1109/TMTT.2018.2881089.
- Kolmakova N., Perov A., Derkach V., Kirilenko A. (2016). Polarization plane rotation by arbitrary angle using D4 symmetrical structures. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 64, No. 2, 429–435. http://doi.org/10.1109/ TMTT.2016.2509966.
- Kulik D. Yu., Mospan L. P., Perov A. O., Kolmakova N. G. (2016). Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots. Telecommunications and Radio Engineering, 75, No. 1, 1–9. http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10.
- Kulik D. Yu., Steshenko S. A., Kirilenko A. A. (2017). Compact polarization plane rotator for arbitrary angle. *Proceedings* of XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (24–27 May 2017). Kyiv, 273–276. http://doi. org/10.1109/ICATT.2017.7972641.
- Li A., Luk K.-M. (2019). Millimeter-wave dual linearly polarized endfire antenna fed by 180 hybrid coupler. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18, No. 7, 1390–1394. https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2917660.
- Lyu Y.-P., Zhu L., Cheng C.-H. (2017). Proposal and synthesis design of differential phase shifters with filtering function. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 65, No. 8, 2906–2917. http://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2673819.
- 45. Marcuvitz N. (1986). Waveguide handbook. USA, Short Run Press Ltd., 446 p.
- Mishra G., Sharma S.K., Chieh J.-C. (2019). A circular polarized feed horn with inbuilt polarizer for offset reflector antenna for W-band CubeSat applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 67, No. 3, 1904–1909. http://doi.org/10.1109/TAP.2018.2886704.
- Mospan L. P., Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Prikolotin S. A. (2014). Spectral properties of a rectangular wave guiding unit involving a pair of rectangular posts of equal heights. *Telecommunications and Radio Engineering*, 73, No. 1, 1–17. http:// doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v73.i1.10.
- Omelianenko M. Yu., Romanenko T. V. (2020). E-plane waveguide bandpass filters with wide stopband. *Visnyk NTUU KPI*. Ser. Radioteknika Radioaparatobuduvannia, 80, 5–13 [in Russian]. http://doi.org/10.20535/RADAP.2020.80.5-13.
- Piltyay S. I. (2009). Radiation of the open end of a thin-walled circular waveguide at co- and cross polarization. Visnyk NTUU KPI. Ser. Radioteknika Radioaparatobuduvannia, 39, 70–76 (in Ukrainian). https://doi.org/10.20535/ RADAP.2009.39.70-76.
- Piltyay S. I. (2012). Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides. *Proceedings of International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory* (28–30 August 2012), Kyiv, 492–495. http://doi.org/10.1109/MMET.2012.6331195.
- Piltyay S. I. (2014). Enhanced C-band coaxial orthomode transducer, Visnik NTUU KPI Seriia Radiotekhnika, Radioaparatobuduvannia, 58, 27–34. https://doi.org/10.20535/RADAP.2014.58.27-34
- Piltyay S. I. (2017). High performance extended C-band 3.4—4.8 GHz dual circular polarization feed system, *Proceedings* of XI IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques (24—27 May 2017). Kyiv, 284—287. http://doi. org/10.1109/ICATT.2017.7972644.
- Piltyay S. (2021). Square waveguide polarizer with diagonally located irises for Ka-band antenna systems. *Advanced Electro-magnetics*, 10, No. 3, 31–38. http://doi.org/10.7716/aem.v10i3.1780.
- Piltyay S. I., Bulashenko A. V., Bykovskyi O. V., Bulashenko O. V. (2022). Estimation of FEM and FDTD methods for simulation of electromagnetic characteristics of polarization transforming devices with diaphragms. *Radio Electronics, Computer Sci., Control*, 4, 34–48 [in Russian]. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-4.
- Piltyay S.I., Bulashenko A.V., Herhil Y.Y. (2021). Numerical performance of FEM and FDTD methods for the simulation of waveguide polarizers. *Visnyk NTUU KPI Seriia Radioteknika Radioaparatobuduvannia*, 84, 11–21. http://doi.org/10.20535/RADAP.2021.84.11-21.

- 56. Piltyay S. I., Bulashenko A. V., Kalinichenko Ye. I. (2022). Analysis of waveguide polarizers using equivalent network and finite elements methods. J. Electromagnetic Waves and Applications, 36, № 12, 1633–1655. http://doi.org/10.1080/ 09205071.2022.2037471.
- 57. Piltyay S., Bulashenko A., Shuliak V., Bulashenko O. (2021). Electromagnetic simulation of new tunable guide polarizers with diaphragms and pins. *Advanced Electromagnetics*, **10**, No. 3, 24–30. http://doi.org/10.7716/aem.v10i3.1737.
- 58. Piltyay S., Bulashenko A., Shuliak V. (2021). Development and optimization of microwave guide polarizers using equivalent network method. *J. Electromagnetic Waves and Applications*, **36**, № 5, 682–705. http://doi.org/10.1080/09205071.2021. 1980913.
- 59. Piltyay S., Bulashenko A., Shuliak V., Bulashenko O. (2021). Comparative analysis of compact satellite polarizers based on a guide with diaphragms. *Advanced Electromagnetics*, **10**, No. 2, 44–55. http://doi.org/10.7716/aem.v10i2.1713.
- Piltyay S., Bulashenko A., Sushko O., Bulashenko O., Demchenko I. (2021). Analytical modeling and optimization of new Ku-band tunable square waveguide iris-post polarizer. *Int. J. Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 34, No. 5, 1–27. http://doi.org/10.1002/JNM.2890.
- Piltyay S. I., Dubrovka F. F. (2013). Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory. *Visnyk NTUU KPI Ser. Radioteknika Radioaparatobuduvannia*, 54, 13–23. http://doi. org/10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
- 62. Pozar D. M. (2012). Microwave Engineering. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley and Sons, 732 p.
- Prikolotin S. A., Kirilenko A. A. (2011). Mode matching technique allowance for field singularities as applied to inner problems with arbitrary piecewise-coordinate boundaries. Part 1. Eigenmode spectra of orthogonic waveguides. *Telecommunications and Radio Engineering*, **70**, No.11, 937–958. http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v70.i11.10.
- Rud L. A., Shpachenko K. S. (2011). Polarizer on sections of square waveguides with inner corner ridges, *Proceedings of VIII IEEE International Conference on Antenna Theory and Techniques* (20–23 May 2011). Kyiv, 338–340. http://doi.org/10.1109/ICATT.2011.6170775.
- Rud L. A., Shpachenko K. S. (2012). Polarizers on a segment of square waveguide with diagonally ridges and adjustment iris. Radioelectronins and Communications Systems, 55, No. 10, 458–463. http://doi.org/10.3103/S0735272712100044.
- 66. Rud L .A., Shpachenko K. S. (2012). Polarizers on the basis of sections of a square waveguide with diagonally arranged square ridges: an electrodynamics model and characteristic. Telecommunications and Radio Engineering, **75**, No. 1, 1–9. http://doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v71.i11.20.
- Ruiz-Cruz J. A., Montejo-Garai J. R., Leal-Sevillano C. A., Rebollar J. M. (2018). Orthomode transducers with folded double-symmetry junctions for broadband and compact antenna feeds. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 66, No. 3, 1160–1168. http://doi.org/10.1109/TAP.2018.2794364.
- Sanchez J. R., Bachiller C., Julia M., Nova B., Esteban H., Boria V. E. (2018). Microwave filter based on substrate integrated waveguide with alternating dielectric line sections. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 28, No. 11, 990–992. http://doi.org/10.1109/LMWC.2018.2871644.
- Serebryannikov A. E., Vasylchenko O. E., Schunemann K. (2004). Fast coupled-integral-equations-based analysis of azimuthally corrugated cavities. *IEEE Microwave Wireless Comp. Lett.*, 14, No. 5, 240–242. http://doi.org/10.1109/ LMWC.2004.827833.
- Steshenko S. O., Prikolotin S. A., Kirilenko A. A., Kulik D. Yu, Rud S. L. (2014). Partial domain technique considering field singularities in the internal problems with arbitrary piecewise-coordinate boundaries. Part 2. Plane-transverse junctions and "in-line objects". *Telecommunications and Radio Engineering*, 73, No. 3, 187–201. http://doi.org/10.1615/Telecom-RadEng.v73.i3.10.
- Sun W., Balanis C. A. (1993). MFIE analysis and design of ridged waveguides. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 41, No. 11, 1965–1971. http://doi.org/10.1109/22.273423.
- Tascone R., Savi P., Trinchenko D., Orta R. (2000). Scattering matrix approach for the design of microwave filter. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 48, No. 3, 423–430. http://doi.org/10.1109/22.826842.
- Tikhov Y. (2016). Comparison of two kinds of Ka-band circular polarisers for use in a gyro-travelling wave amplifier. IET Microwaves Antennas and Propagation, 10, No. 2, 147–151. http://doi.org/10.1049/IET-MAP.2015.0292.
- 74. Virone G., Tascone R., Baralis M., Peverini O. A., Oliver A., Orta R. (2005). A novel design tool for waveguide polarizers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 53, No 3, 888–894. http://doi.org/10.1109/TMTT.2004.842491.
- 75. Virone G., Tascone R., Peverini O. A., Orta R. (2007). Optimum iris set concept for waveguide polarizers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **17**, No. 3, 202–204. http://doi.org/10.1109/LMWC.2006.890474.
- Virone G., Tascone R., Peverini O. A., Addamo G., Orta R. (2008). Combined-phase-shift waveguide polarizer. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 18, No. 8, 509–511. http://doi.org/10.1109/LMWC.2008.2001005.

- Zafar H., Odeh M., Khilo A., Dahlem M.S. (2020). Low-loss broadband silicon TM-pass polarizer based on periodically structured waveguides. *IEEE Photonics Technology Letters*, **32**, No. 17, 1029–1032. https://doi.org/10.1109/LPT.2020. 3011056.
- Zhang F., Huang M., Wang H, Chen G. (2010). Study of dual-frequency polarizer for electron cyclotron resonance heating systems of 105 and 140 GHz. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48, No. 5, 1298–1302. http://doi.org/10.1109/ TPS.2020.2984084.
- 79. Zheng S. Y., Chan W. S., Man K. F. (2010). Broadband phase shifter using loaded transmission line. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, **20**, No. 9, 498–500. http://doi.org/10.1109/LMWC.2010.2050868.
- Wang X., Huang X., Jin X. (2016). Novel square/rectangle waveguide septum polarizer. *Proceedings of IEEE Internation*al Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (16–19 October 2016). Nanjing, China. http://doi.org/10.1109/ICU-WB.2016.7790510.

Стаття надійшла до редакції	28.10.2020
Після доопрацювання	15.04.2022
Прийнято до друку	16.04.2022

Received 28.10.2020 Revised 15.04.2022 Accepted 16.04.2022

S. I. Piltyay¹, Ph. D. in Tech, Associate Professor

- E-mail: s.piltiai@kpi.ua
- *A. V. Bulashenko*¹, Senior Lecturer
- E-mail: a.bulashenko@kpi.ua
- *A. V. Polishchuk*¹, graduate student
- E-mail:animeshka177al@gmail.com
- O. V. Bulashenko², student
- E-mail: alex.bulashenko2020@gmail.com

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

- 37, Peremohy Ave., Kyiv, 03056 Ukraine
- ² Ivan Kozhedub Shostka Professional College of Sumy State University

1, Institutskaya st., Shostka, Sumy region, 41100 Ukraine

MICROWAVE WAVEGUIDE POLARIZER FOR SATELLITE COMMUNICATION ANTENNAS WITH CIRCULAR POLARIZATION

The volumes of information transmitted in modern satellite telecommunication systems are constantly increasing. Antennas with signal polarization processing, which is performed by polarizers, are the fundamental elements of such systems. Therefore, the development of methods for the analysis of new polarizers is an important problem. From a technological point of view, polarizers based on waveguides with irises are the simplest. Analysis and optimization of electromagnetic characteristics of a polarizer based on a square waveguide with irises are the goals of the presented research. To solve this optimization problem, we have created a new mathematical model, which allows investigating the influence of the design parameters of the polarizer on its electromagnetic characteristics. A mathematical model of the waveguide polarizer with irises was created by the method of decomposition using wave transmission and scattering matrices. Besides, the new mathematical model takes into account the thickness of the irises using their equivalent T- and Π -shaped substitution circuits. The general wave scattering matrix is the basis of a new mathematical model of a waveguide polarizer. This matrix was determined using the theory of microwave circuits. The main characteristics of the waveguide polarizer were determined through the elements of this matrix. Here, we perform the optimization of the polarizer characteristics in the Ku-band 10.7–12.8 GHz. The developed new mathematical model of a waveguide polarizer were determined through the elements of this matrix. Here, we perform thickness. The new mathematical model determines the electromagnetic characteristics of the waveguide polarizer were determined through the elements of this matrix. Here, we perform the optimization of the polarizer characteristics in the Ku-band 10.7–12.8 GHz. The developed new mathematical model of a waveguide polarizer with irises, distances between them and their thickness. The new mathematical model determines the electromagnetic characteristi

Keywords: polarizer, diaphragm, waveguide, iris, transfer matrix, scattering matrix, differential phase shift, voltage standing wave ratio, axial ratio, crosspolar discrimination.

Космічна й атмосферна фізика

Space and Atmospheric Physics

https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062 УДК 550.388

Y. LUO, аспірант ORCID ID: 0000-0002-3376-5814 E-mail: yiyangluo@163.com J. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук, проф. ORCID ID: 0000-0001-5777-2392 E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com €. Г. ЖДАНКО, аспірант, мол. наук. співроб. ORCID ID: 0000-0002-4612-4194 E-mail: eugenezhd@gmail.com

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

ІОНОСФЕРНІ ЕФЕКТИ РАКЕТ, ЩО СТАРТУЮТЬ НА ФОНІ ГЕОКОСМІЧНИХ БУР

Іоносферні ефекти, викликані стартами та польотами крупних ракет, вивчаються понад шість десятиліть. Проте достатньо повних і адекватних моделей генерації та поширення збурень у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера в цілому, що викликаються стартами та польотами великих ракет, у даний час немає. Виявляється, що ціла низка фізичних ефектів під час іоносферних бур і стартів ракет подібні. Тому наявність іоносферної бурі суттєво ускладнює пошук реакції іоносфери на запуски космічних апаратів.

Мета роботи — опис результатів спостережень іоносферних процесів, що супроводжували старти та польоти ракет на фоні іоносферних бур. Для аналізу вимірювань залучено дані спостережень стану іоносфери до, під час та після запуску ракет «Союз» і «Протон» з космодрому Байконур (Республіка Казахстан). Спостереження велися у Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна (поблизу м. Харків, Україна). Для вимірювань використовувався допплерівський радар вертикального зондування. Спостереження виконано протягом 24-го циклу сонячної активності (2009—2021 рр.). Кількість стартів ракети «Союз» становить 81, ракети «Протон» — 53.

Виявлення реакції іоносфери на віддалений на 2000 км старт і політ крупної ракети на фоні геокосмічної бурі допплерівським методом зазвичай можливе при значенні індексу $K_{pmax} \leq 5$, а при більших величинах воно дуже ускладнене або взагалі неможливе. У низці випадків складно визначити реакцію навіть при $K_{pmax} = 4$. Для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети допплерівський радар повинен працювати у діапазоні частот від 1.5...2 до 4...6 МГц. Підтверджено реєстрацію кількох груп горизонтальних позірних (видимих) швидкостей поширення збурень: 1.7...3 км /с і більше, 700...1000, 300...700, 150...260 м/с.

Ключові слова: старт ракети, іоносферний ефект, магнітна буря, іоносферна буря, аперіодичне збурення, квазіперіодичне збурення, час запізнення, позірна швидкість.

вступ

Іоносферні ефекти, що супроводжують старти та польоти великих ракет, вивчаються понад шість десятиліть. Опубліковано десятки наукових статей та монографії (див., наприклад, [5, 6, 12, 13]). При цьому встановлено, що ефекти проявляються у всіх підсистемах системи Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера (ЗАІМ) та

Цитування: Luo Y., Чорногор Л. Ф., Жданко Є. Г. Іоносферні ефекти ракет, що стартують на фоні геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 62—85. https://doi.org/10.15407/knit2022.03.062

відрізняються великою різноманітністю [5, 13]. Параметри ефектів суттєво залежать від стану системи Сонце — міжпланетне середовище магнітосфера — іоносфера — атмосфера — Земля (СМСМІАЗ), атмосферно-космічної погоди, географічних координат космодромів і засобів спостереження, типу ракет, їхньої траєкторії та виду палива, а також низки інших факторів.

Наукова значущість дослідження реакції системи ЗАІМ на старти та польоти ракет полягає в тому, що вони сприяють кращому розумінню взаємодії підсистем у цій системі, механізмів генерації та перенесення збурень аж до глобальних відстаней.

Практична значущість досліджень пов'язана із впливом збурень від стартів і польотів ракет на середовище, екологічну обстановку в системі ЗАІМ, на характеристики радіохвиль різних діапазонів і, зрештою, на працездатність засобів телекомунікації, радіонавігації, радіолокації, радіоастрономії та дистанційного радіозондування.

В даний час немає достатньо повних і адекватних моделей генерації та поширення збурень у системі ЗАІМ в цілому, що викликаються стартами та польотами великих ракет. Цим пояснюється актуальність даної роботи.

При пошуку реакції системи ЗАІМ на старти та польоти ракет спостереження, як правило, ведуться у спокійних умовах, при відсутності інших джерел збурення. Це вдається не завжди. Системи ЗАІМ і СМСМІАЗ часто виявляються збуреними. Найбільш сильним і значущим джерелом глобальних збурень є геокосмічні бурі. Вони викликаються сонячними бурями, що супроводжуються спалахами, викидами корональної маси та генерацією високошвидкісних потоків. В результаті геокосмічної бурі на Землі виникає магнітна буря (МБ), іоносферна буря (ІБ), атмосферна буря та електрична буря [7, 10].

Під час ІБ у 2...10 разів може збільшуватися або зменшуватися концентрація електронів N, значно збурюються температури електронів та іонів, порушується динамічний режим іоносферної плазми, активується взаємодія всіх підсистем у системі ЗАІМ, генеруються нестійкості та хвильові процеси різної фізичної природи. При стартах і польотах ракет також зменшується *N*, виникають іоносферні «діри», генеруються нестійкості та хвильові процеси.

Таким чином, ціла низка фізичних ефектів під час ІБ і стартів ракет подібні. Наявність ІБ суттєво ускладнює пошук реакції іоносфери на запуски космічних апаратів.

Мета цієї роботи — опис результатів багаторічних спостережень іоносферних процесів, що супроводжували старти та польоти ракет на фоні ІБ впродовж 24-го циклу сонячної активності (2009—2021 рр.).

Спроби виділення реакції іоносфери на старти та польоти ракет на фоні геокосмічних бур робилися і раніше [2, 3, 8, 14, 15]. Прояв характеристик збурень залежить від методу спостережень, оскільки різні радіофізичні методи реєструють різні параметри сигналу та досліджують різні області іоносфери. У цих роботах використовувалися методи часткових відбиттів, вертикального допплерівського зондування та вертикального зондування (іонозондовий метод). Встановлено, що реакція іоносфери на старти та польоти ракет суттєво залежить від стану атмосфернокосмічної погоди. Можлива синергетична взаємодія ефектів стартів ракет та ІБ, їхнє взаємне посилення. Як і слід було очікувати, ефекти ІБ суттєво ускладнюють виділення ефектів стартів і польотів великих ракет. Потрібні подальші дослідження цієї проблеми. Для цього проведено багаторічні вимірювання та створено базу даних за 1991—2021 рр.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

Для аналізу вимірювань залучено дані спостережень за станом іоносфери до, під час та після запуску ракет «Союз» і «Протон» з космодрому Байконур. Основні відомості про ракети наведено у табл. 1—3. Ракети стартували в різний час доби за суттєво різної магнітної активності, а значить і різної збуреності іоносфери.

Спостереження велися у Радіофізичній обсерваторії ХНУ імені В. Н. Каразіна. Для вимірювань використовувався допплерівський радар вертикального зондування. Основні параметри допплерівського радара: діапазон частот — 1... 24 МГц, потужність радіопередавального при-

Папалент	Ракета			
параметр	«Союз»	«Протон»		
Тип ракети	важка	важка		
Початкова маса, т	312	705711		
Тяга нульового ступеня, кН	818	_		
Час роботи нульового ступеня, с	140	_		
Тяга першого ступеня, кН	1019	10780		
Час роботи першого ступеня, с	118	121		
Тяга другого ступеня, кН	792	2400		
Час роботи другого ступеня, с	320	211		
Тяга третього ступеня, кН	_	31		
Час роботи третього ступеня, с	_	240.5258.3		

Таблиця 1. Основні відомості про ракети «Союз» і «Протон»

Таблиця 2. Циклограма польоту ракети «Союз»

строю — 1 кВт, тривалість зондувального імпульсу — 0.5 мс, частота повторення імпульсів — 100 Гц, смуга пропускання прикінцевого фільтра — 10 Гц, коефіцієнт підсилення вертикальної ромбічної антени — 1...10 залежно від робочої частоти. Розрізнення за допплерівським зміщенням частоти (ДЗЧ) — близько 17 мГц. Вимірювання, як правило, ведуться на двох фіксованих частотах — 3.2 і 4.2 МГц. Менша з них ефективна при дослідженні динамічних процесів у *E*- і *F*₁-шарах, а більша — у *F*₁ і *F*₂-шарах.

Для забезпечення прийнятного розрізнення за висотою (20...30 км) для кожного відбитого сигналу застосовувалось стробування в діапазоні діючих висот 75...450 км, що відповідало діапазону істинних висот 75...225 км у денний і 75...325 км у нічний час. Спостереження вико-

Стадія польоту	Час, с	Висота, км	Відстань від космодрому, км	Швидкість, км/с
Вертикальний підйом	8	~1	0	~0.1
Відділення нульового ступеня	119	48	44	1.8
Скидання стулок головного обтічника	151	78	96	2.1
Вимкнення двигуна першого ступеня	286	171	451	3.9
Вимкнення двигуна другого ступеня	522	200	1680	7.7
Відділення космічного апарата	527	200	1715	7.8

Таблиця З. Циклограма польоту ракети «Протон»

Стадія польоту	Час, с	Висота, км	Відстань від космодрому, км	Швидкість, км/с
Вертикальний підйом	10	~1	0	~0.1
Максимальний швидкісний напір	65.5	11	15	0.465
Увімкнення першого ступеня	119	40	63	1.626
Відділення першого ступеня	123.4	42	70	1.726
Увімкнення другого ступеня	334.5	120	498	4.450
Розділення другого та третього ступенів	335.2	120	500	4.453
Увімкнення третього ступеня	337.6	120	510	4.460
Скидання головного обтічника	348.2	123	560	4.497
Вимкнення третього ступеня	588.3	150	2030	7.179
Відділення орбітального блоку	588.4	151	2031	7.182

нано протягом 24-го циклу сонячної активності (2009—2021 рр.). Кількість пусків ракети «Союз» становить 81, ракети «Протон» — 53. Спостереження за реакцією іоносфери виконувалося як до, так і після старту ракети протягом 6...12 год.

Застосування до часових варіацій сигналу биття прийнятого та опорного сигналів перетворення Фур'є на інтервалі часу 60 с дозволило побудувати часові залежності допплерівських спектрів (ДС) у діапазоні значень –1...+1 Гц. Час запізнення Δt можливої реакції іоносфери на старт і політ ракети визначався за змінами характеру варіацій ДС.

СТАН КОСМІЧОЇ ПОГОДИ

Стан космічної погоди будемо описувати за допомогою індексів K_p , D_{st} , $F_{10.7}$ і W. Перелік значень цих індексів для дня зі стартом ракети, а також у сусідні дні наведено у табл. 4. Видно, що K_p -індекс набував значень 4–, 5–, 6 і 7–. Відпо-

Π	Час старту	Tree accounts	V	D _{st}		E	Ш
Дата	ракети (UT)	тип ракети	min ma		max	<i>F</i> _{10.7}	W
08.10.2019			1+1+1+1-1-12-1	-10	4	67.0	0
09.10.2019	10:17:56	«Протон»	2-2+2-4-1+2-11+	-15	7	67.9	0
10.10.2019			1+4+4+21+31+2-	-27	7	67.3	0
02.06.2010			2 3-1+1-1+2-1+2	-35	-17	76.1	18
03.06.2010	22:00:08	«Протон»	1+2-2-3+2+2-3-3+	-28	-9	76.8	21
04.06.2010			5-423+2-11+2-	-53	-21	74.0	28
28.09.2011			4+ 5- 4+ 2+ 4- 3 2- 1+	-68	-32	134.0	109
29.09.2011	18:31:59	«Протон»	6-54-233-3-2-	-56	-29	137.0	128
30.09.2011			3 0+ 0 0+ 1- 1- 3 3	-35	1	138.5	116
07.12.2013			2 1 2-0 0+0+2 3-	-8	17	152.3	89
08.12.2013	12:12	«Протон»	6 6 - 4 - 2 2 3 + 3 2 -	-66	13	160.6	95
09.12.2013			$1 - 0\ 0\ 0 + 1 + 2\ 1 + 1 +$	-28	-14	163.1	142
08.07.2012			2-2-2-32+3-2+4+	-10	18	183.7	117
09.07.2012	18:38:30	«Протон»	5-4-4+4-7-5+3+4+	-78	-27	179.6	122
10.07.2012			4-23-4-3-22+2	-65	-23	179.2	107
27.09.2017			3 3-5-4 4-4-6-6+	-44	41	91.3	37
28.09.2017	18:52	«Протон»	5+6+7-5-4-44-5-	-56	-24	91.2	42
29.09.2017			3 2+ 2+ 3-3+ 2- 2 3-	-28	-4	90.0	42
01.04.2010			3+322-3+31+3-	-24	-3	79.1	22
02.04.2010	04:04:33	«Союз»	3 3-4-3 2 2 3 3-	-33	-8	76.1	22
03.04.2010			3-1+1+123+3-2+	-23	-6	77.4	24
24.03.2014			2-01-111+1-0	-10	5	157.7	137
25.03.2014	21:17:23	«Союз»	0+0+0+2-2-1+33+	-8	16	152.0	136
26.03.2014			4-1+4-1+1-1-2-1	-23	-3	152.5	112
14.06.2010			1+11+11-1-11-	-14	4	75.1	14

Таблиця 4. Стан космічної погоди

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28. № 3

Закінчення табл. 4

Дата	Час старту	Тип ракети	K_p	D _s	t	F _{10.7}	W
			-	min	max		
15.06.2010	21:35:19	«Союз»	1-1+2-2+1+2+2+3	-10	17	72.3	0
16.06.2010			3+3+33+33+4-3	-36	-13	73.9	0
24.09.2014			4-4-3-44-3+34	-40	-21	145.6	108
25.09.2014	20:25	«Союз»	4-2+2+3-22-2+3	-30	-11	167.8	144
26.09.2014			3 3+ 3- 3- 4 3+ 2 3	-40	-13	171.0	165
14.12.2015			2 2 1 - 1 3 4 + 5 - 5 +	-47	26	120.2	86
15.12.2015	11:03:09	«Союз»	5-4-2+2-33+1+3-	-38	-10	115.2	65
16.12.2015			4-30+0+00+0+0+0+	-27	0	122.2	63
06.07.2016			0 0+ 0+ 1-1-1 1+ 3-	-3	21	79.7	13
07.07.2016	01:36:41	«Союз»	3-3-3-3-3+4+5-4+	-17	21	86.1	25
08.07.2016			3+ 2+ 3+ 4-4 4- 4 2+	-27	1	90.0	42

відно до класифікації [7, 10] таким значенням відповідають МБ наступних класів: вельми помірна, помірна, сильна та дуже сильна.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЕФЕКТІВ СТАРТУ РАКЕТИ «ПРОТОН»

Вельми помірна маенітна буря. Приклад часових варіацій ДС для денного старту ракети «Протон» 9 жовтня 2019 р. о 10:17:56 (тут і надалі всесвітній час UT) в умовах вельми помірної МБ ($K_{pmax} =$ = 4—) наведено на рис. 1. Видно, що у день старту хвильова активність була досить високою. Хвильові збурення спостерігалися постійно. Їхня амплітуда f_{da} не перевищувала 0.15 Гц, а період *T* становив 10...15 хв. Зміна характеру варіацій ДС спостерігалася з часом запізнення Δt відносно моменту старту ракети близько 22, 80, 137, 233 і 268 хв. Характер варіацій суттєво змінювався після заходу Сонця на висотах іоносфери (приблизно після 15:20).

Помірна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, що супроводжували нічний старт ракети «Протон» 3 червня 2010 р. о 22:00:08, наведено на рис. 2. Видно, що характер варіацій змінювався з часами запізнення 27, 52, 75 і 148 хв. Приблизно після 00:28 відбитий сигнал, поступово зміщуючись з діючих висот 150...225 км до висот 375...450 км, перестав рееструватися. Після 01:00 з'явився слабкий відбитий сигнал. Область відбиття поступово зміщувалася вниз, і відбитий сигнал з діючих висот 150...225 км знову з'явився близько 01:48.

Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц протягом того ж часу показано на рис. 3. Видно, що характер варіацій змінювався з часами запізнення близько 25, 50, 70 і 135 хв. Відбитий сигнал був відсутній у всіх каналах з 00:15 до 02:50.

Сильна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС, які супроводжували нічний старт ракети «Протон» 29 вересня 2011 р. о 18:31:59, наведено на рис. 4. Протягом усього часу спостережень мало місце або розширення ДС, або їхнє «розсипання». Сильно змінювався період квазіперіодичних збурень ДС. Часто варіації були аперіодичними. На частоті 3.2 МГц зміни характеру варіацій спостерігалися через 10, 93 і 173 хв після старту ракети. На частоті 4.2 МГц вони дорівнювали 10, 84 і 170 хв.

Сильна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС, які реєструвалися під час вечірнього старту ракети «Протон» 8 грудня 2013 р. о 12:12, показано на рис. 5. Видно, що протягом усього часу спостережень хвильова активність була сильною: амплітуда f_{da} досягала 0.5...0.6 Гц, пе-



Рис. 1. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у денний час 9 жовтня 2019 р. о 10:17:56 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км. Тут і далі 3С – захід Сонця

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28. № 3



Рис. 2. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у нічний час 3 червня 2010 р. о 22:00:08 UT. Діапазон діючих висот 150...225 км (ліворуч) і 375...450 км (праворуч). Тут і далі СС – схід Сонця



Рис. 3. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у нічний час 3 червня 2010 р. о 22:00:08 UT. Діапазон діючих висот 150...225 км (ліворуч) і 375...450 км (праворуч)



Рис. 4. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у нічний час 29 вересня 2011 р. о 18:31:59 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



Рис. 5. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у денний час 8 грудня 2013 р. о 12:12 UT. Діапазон діючих висот 225...300 км



Рис. 6. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у вечірній час 9 липня 2012 р. о 18:38:30 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км


Рис. 7. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Протон» у вечірній час 28 вересня 2017 р. о 18:52 UT. Діапазон діючих висот 375...450 км

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28. № 3

ріод $T \approx 10$ хв. Виявити зміну характеру варіацій важко. Імовірно, вона спостерігалася через 14, 48, 65, 107 і 130 хв після старту ракети. На можливі ефекти старту ракети наклалися ефекти вечірнього сонячного термінатора.

Дуже сильна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, які супроводжували вечірній старт ракети «Протон» 9 липня 2012 р. о 18:38:30, наведено на рис. 6. Видно, що варіації ДС протягом усього часу спостережень були аперіодичними. Варіації ДЗЧ були значними: від —1 до 1 Гц. Ефекти від старту ракети та вечірнього термінатора наклалися. Можливо, що реакція на старт ракети відмічалася з часом запізнення 14, 45 і 79 хв. Лише після 19:58 збурення стали квазіперіодичними з $T \approx 23$ хв і $f_{da} \approx 0.1...0.3$ Гц.

Дуже сильна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС, що послідували за нічним стартом ракети «Протон» 28 вересня 2017 р. о 18:52, показано на рис. 7. Видно, що протягом всього часу спостереження мав місце ефект «розсипання» ДС. Часи запізнення можливої реакції іоносфери на старт ракети становили 48, 118, і 208 хв. Амплітуда f_{da} досягала 0.5 Гц, а $T \approx 25...30$ хв.

РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЕФЕКТІВ СТАРТУ РАКЕТИ «СОЮЗ»

Вельми помірна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС, які супроводжували старт ракети «Союз» у перехідний час доби 2 квітня 2010 р. о 03:04:33, наведено на рис. 8. 3 рис. 8 можна бачити, що до 03:20 сигнал на частоті 4.2 МГц через низькі значення N у нічний час у період глибокого мінімуму сонячної активності був відсутній. Майже протягом усього часу спостережень ДС залишалися практично одномодовими. Зміна характеру варіацій ДС відмічалася через 25, 117 і 161 хв після старту ракети.

Вельми помірна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС у період, близький до весняного рівнодення, наведено на рис. 9. Ракета «Союз» стартувала 25 березня 2014 р. о 21:17:23. ДС залишалися більш-менш одномодовими лише в окремих інтервалах часу (з 21:00 до 22:10 25 березня 2014 р., з 02:27 до 03:47 26 березня 2014 р.). У решті інтервалів часу спостерігалося «розси-

пання» спектрів. Пошук реакції на старт ракети був ускладнений. Можливі часи запізнення реакції іоносфери на старт космічного апарата становили 60, 103, 182 хв.

Вельми помірна магнітна буря. Нічний старт ракети «Союз» відбувся 15 червня 2010 р. о 21:35:19. Подія мала місце поблизу періоду літнього сонцестояння. При цьому Сонце на висотах понад 250 км не заходить. Приблизно до 22:00 відбитий сигнал на частотах 3.2 і 4.2 МГц був відсутній (рис. 10). Протягом усього часу існування ДС вони були розширеними, епізодично спостерігалося їхнє «розсипання». Було складно визначити моменти часу запізнення реакції на старт ракети. Можливо, вона мала місце при $\Delta t \approx 24$, 73, 139 і 191 хв, якщо судити з варіацій ДС на частоті 3.2 МГц. На частоті 4.2 МГц ці часи становили 24, 66, 139 і 191 хв.

Вельми помірна магнітна буря. Нічний старт ракети «Союз» мав місце 25 вересня 2014 р. о 20:25, поблизу періоду осіннього рівнодення. Приклад часових варіацій ДС на частоті 3.2 МГц, що настали за стартом ракети, показано на рис. 11. Видно, що поведінка ДС була нерегулярною. В окремих інтервалах часу сигнал взагалі був відсутній. Після 02:20 він став більш-менш регулярним. Визначення реакції іоносфери на запуск космічного апарата було ускладнено.

Поведінка ДС на частоті 4.2 МГц була схожою.

Сильна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС, що реєструвались після денного старту ракети «Союз» 15 грудня 2015 р. о 11:03:09, тобто поблизу періоду зимового сонцестояння, показано на рис. 12. Можна бачити, що хвильова активність була високою, що властиво всім грудневим вимірюванням. Амплітуда квазіперіодичних варіацій ДЗЧ після старту ракети збільшилася від 0.20...0.25 до 0.4...0.5 Гц. Квазіперіод суттєво не змінився і становив близько 10 хв. Зміна характеру сигналу мала місце з часами запізнення близько 11, 62, 103 і 150 хв.

Сильна магнітна буря. Приклад часових варіацій ДС у нічний час поблизу періоду літнього сонцестояння наведено на рис. 13. Ракета «Союз» стартувала 7 липня 2016 р. о 01:36:41. Приблизно з 01:00 і до 02:45 варіації ДС відрізнялися нерегулярністю. В інтервалі часу від 02:45



Рис. 8. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 2 квітня 2010 р. о 03:04:33 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



Рис. 9. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 25 березня 2014 р. о 21:17:23 UT. Діапазон діючих висот 375...450 км



Рис. 10. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 15 червня 2010 р. о 21:35:19 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



Рис. 11. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 25 вересня 2014 р. о 20:25 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км



Рис. 12. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 4.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у денний час 15 грудня 2015 р. об 11:03:09 UT. Діапазон діючих висот 225...300 км



Рис. 13. Часові варіації допплерівських спектрів на частоті 3.2 МГц, що настали після старту ракети «Союз» у нічний час 7 липня 2016 р. о 01:36:41 UT. Діапазон діючих висот 300...375 км

до 04:00 вони були більш-менш регулярними, після чого знову стали нерегулярними. Зміни характеру варіацій ДС спостерігалися через 29, 69 і 109 хв після старту ракети.

обговорення

Розглянемо вплив магнітних бур, точніше пов'язаних з ними іоносферних бур, на ефекти, що викликаються стартами ракет в іоносфері.

Протягом 24-го циклу сонячної активності стартувала 81 ракета «Союз» і 53 ракети «Протон». Для ракети «Союз» старт супроводжувався у 20 випадках МБ, а у 23 випадках — магнітним збуренням з індексом $K_{pmax} = 3$, а для ракети «Протон» — відповідно у 13 і 12 випадках. Для інших дат індекс K_p змінювався від 0 до 2.

Зауважимо, що статистика МБ у 24-му циклі сонячної активності обговорюється у роботах [9, 11].

Старт ракети «Протон» 9 жовтня 2019 р. Вельми помірна МБ ($K_{pmax} = 4-$) практично не вплинула на часові варіації ДС у денний час (див. рис. 1). Часам запізнення $\Delta t = 22$, 80, 137, 233 і 268 хв відповідають горизонтальні позірні швидкості v', які дорівнюють 2.35 км/с, 530, 300, 175 і 150 м/с. Швидкість v' оцінювалася із співвідношення

$$v' = \frac{R}{\Delta t - \Delta t_0}$$

де R — відстань між областю генерації збурень та місцем спостереження (для Байконура $R \approx 2400$ км), $\Delta t_0 \approx 5$ хв — час руху ракети до області генерації збурень. Найменші значення v', близькі до 175 і 150 м/с, не пов'язані зі стартом ракети, а зумовлені дією на іоносферу вечірнього сонячного термінатора.

Старт ракети «Протон» 3 червня 2010 р. Помірна МБ ($K_{pmax} = 5-$) практично не вплинула на часові варіації ДС на частоті 3.2 МГц і в нічний час (див. рис. 2). Значенням часових затримок, що дорівнюють 27, 52, 75 і 148 хв, відповідають значення v' = 1.8 км/с, а також 850, 570 і 280 м/с.

Часові варіації ДС на частоті 4.2 МГц дуже відрізнялися від упорядкованих варіацій ДС на частоті 3.2 МГц (див. рис. 3). Більшу частину часу спостерігався ефект «розсипання» ДС. Часи запізнення були близькі до 25, 50, 70 і 135 хв. Важливо, що ці часи були меншими, ніж на частоті 3.2 МГц. Їм відповідали швидкості близько 2 км/с, а також 890, 615 і 310 м/с, котрі перевищували швидкості, обчислені з вимірювань на частоті 3.2 МГц. Це підтверджує той факт, що збурення викликані саме стартами ракет і поширювалися вздовж іоносфери в напрямку обсерваторії. Справа в тому, що радіохвиля з більшою частотою відбивається вище, де швидкості поширення більші.

Старт ракети «Протон» 29 вересня 2011 р. Сильна МБ ($K_{pmax} = 6-$) суттево вплинула на ДС на частотах 3.2 і 4.2 МГц. Увесь час спостереження відмічався ефект «розсипання» ДС (див. рис. 4). Варіації ДС були скоріше аперіодичними. Визначення часів запізнення дуже ускладнене. Можливо, що на частотах 3.2 і 4.2 МГц вони становили 10, 93 і 173 хв, а також 10, 84 і 170 хв. Їм відповідали позірні швидкості близько 8 км/с, 455 і 238 м/с, а також 8 км/с, 506 і 242 м/с. Співвідношення другої та третьої швидкостей дозволяє стверджувати, що вони пов'язані зі стартом ракети.

Старт ракети «Протон» 8 грудня 2013 р. На відміну від інших сезонів, узимку, точніше у грудні, значно посилюється хвильова активність (див. рис. 5, 12). До того ж у день старту ракети реєструвалася сильна МБ ($K_{pmax} = 6$). Все це дуже ускладнило пошук реакції іоносфери на старт ракети. Приблизно після 13:30 додався вплив вечірнього сонячного термінатора (див. рис. 5). Можливі часи запізнення реакції іоносфери на старт космічного апарата склали 14, 48, 65, 107 і 130 хв, чому відповідають позірні швидкості 4.4 км/с, а також 930, 670, 390 і 320 м/с.

Старт ракети «Протон» 9 липня 2012 р. Дуже сильна МБ ($K_{pmax} = 7-$) істотно вплинула на характер варіацій ДС (див. рис. 6). До того ж наклався вплив вечірнього сонячного термінатора. Усе це ускладнювало виявлення реакції іоносфери на старт ракети. Можливо, що ця реакція спостерігалася через 14, 45 і 79 хв після події, чому відповідають позірні швидкості 4.4 км/с, а також 1000 і 540 м/с.

Старт ракети «Протон» 28 вересня 2017 р. Вплив дуже сильної МБ був значним: весь час спостереження відмічався ефект «розсипання» ДС, квазіперіодичні варіації ДС досягали 0.5 Гц, а період — 25...30 хв (див. рис. 7). Хвильові збурення з такими параметрами викликаються МБ. При цьому на широтах порядку 70° генеруються атмосферні гравітаційні хвилі (АГХ), котрі поширюються в екваторіальному напрямку. Визначення реакції іоносфери на старт космічного апарата дуже ускладнене. Зміна характеру варіацій мала місце через 48, 118 і 208 хв після старту ракети, чому відповідає позірна швидкість близько 930, 350 і 200 м/с. Мабуть, найменша з них не пов'язана зі стартом космічного апарата. Вплив ранкового сонячного термінатора почав проявлятися значно пізніше, приблизно після 01:00.

Старт ракети «Союз» 2 квітня 2010 р. Вельми помірна МБ ($K_{pmax} = 4-$) практично не вплинула стан нічної іоносфери та часові варіації ДС (див. рис. 8). Після старту ракети у місці спостереження тривали ефекти, спричинені ранковим сонячним термінатором (див. рис. 8). Загалом часові варіації ДС були нерегулярними. Можливі часи запізнення реакції іоносфери на старт ракети становили 25, 117 і 161 хв. Їм відповідали значення v' = 2 км/с, 360 і 255 м/с.

Старт ракети «Союз» 25 березня 2014 р. Незважаючи на те, що МБ належала до вельми помірних ($K_{pmax} = 4$ —), нічна іоносфера поблизу періоду весняного рівнодення була збуреною. Найчастіше спостерігався ефект «розсипання» ДС (див. рис. 9). Причина аномально великих варіацій ДЗЧ (від —0.9 до 0.9 Гц) криється у близькості частоти радіохвилі до критичної частоти шару F_2 іоносфери в нічний і перехідний час доби. Усе це ускладнило виявлення реакції на старт космічного апарата. Якщо прийняти, що значення Δt дорівнювали 60, 103 і 182 хв, то отримаємо, що значення v' близькі до 730, 410 і 225 м/с.

Старт ракети «Союз» 15 червня 2010 р. Подія мала місце поблизу періоду літнього сонцестояння та періоду глибокого мінімуму сонячної активності. ДС зазнавали нерегулярних варіацій, які навряд чи могли бути зумовлені вельми помірною МБ ($K_{pmax} = 4-$) (див. рис. 10). Можливі часи запізнення на частотах 3.2 і 4.2 МГц, які дорівнюють 24, 139 і 191 хв, збіглися. Це означає, що варіації ДС викликані іншим джерелом. За Δt , яке дорівнювало 73 і 66 хв для частот 3.2 і 4.2 МГц відповідно маємо $v' \approx 590$ і 655 м/с. Таке співвідношення швидкостей дозволяє стверджувати, що збурення зумовлене стартом ракети та переносилося за допомогою АГХ.

Старт ракети «Союз» 25 вересня 2014 р. Подія мала місце у нічний час поблизу періоду осіннього рівнодення. І хоча МБ відносилася до вельми помірних ($K_{pmax} = 4-$), іоносфера, а отже і ДС, були сильно збуреними (див. рис. 11). Регулярний характер у поведінці ДС став спостерігатися після 02:20, але пов'язаний він не зі стартом ракети, а з рухом ранкового сонячного термінатора. Зміна характеру варіацій ДС на частотах 3.2 і 4.2 МГц наставала практично синхронно. Можливі значення Δt становили 18, 60, 90, 145 і 190 хв. Усі значення, крім $\Delta t \approx 18$ хв. не пов'язані зі стартом ракети. За $\Delta t = 18$ хв маємо $v' \approx 3$ км/с. Така швидкість не належить до АГХ, а тому не залежить від висоти відбиття радіохвилі, а отже і від її частоти.

Старт ракети «Союз» 15 грудня 2015 р. Ефекти помірної МБ ($K_{pmax} = 5-$) наклалися на ефекти, властиві іоносфері у грудні (див. рис. 12). Зміни характеру часових варіацій ДС відмічалися приблизно через 11, 62, 103 і 150 хв після старту ракети, чому відповідають видимі швидкості приблизно 6.7 км/с, 700, 410 і 275 м/с.

Старт ракети «Союз» 7 липня 2016 р. Старт стався у перехідний час доби. На можливі ефекти від старту наклалися ефекти ранкового сонячного термінатора та помірної МБ ($K_{pmax} = 5-$). Варіації ДС часто мали хаотичний характер, що ускладнило пошук реакції іоносфери на запуск космічного апарата. Можливо, вона спостерігалася з часом запізнення, що дорівнює 29, 69 і 109 хв. Тоді v' становить 1.67 км/с, 625 і 385 м/с.

Підведемо підсумки. Магнітна буря, сонячний термінатор та інші високоенергетичні джерела можуть значно маскувати іоносферні ефекти стартів і польотів великих ракет. У випадку наявності магнітних збурень з індексом $K_{pmax} \leq 3$, вельми помірних та помірних МБ найчастіше вдається впевнено виділити реакцію іоносфери на запуски космічних апаратів. При збільшенні індексу K_{pmax} це зробити все складніше. Надійність визначення реакції залежить не тільки від інтенсивності МБ і IБ, а й від сезону року, часу доби, типу ракети, наявності інших джерел збурення.

При стартах ракет спостерігалося декілька груп горизонтальних позірних швидкостей: 1.7...3 км/с і більше, 700...1000, 300...700 і 150...260 м/с. Перша група, мабуть, має швидкість повільних МГД-хвиль [4]. Вона визначається не завжди. Швидкість 700...1000 м/с властива ударним хвилям щільності в атмосфері [5, 13], швидкість 300...700 м/с типова для АГХ техногенного походження [5, 13], а найменша швидкість властива АГХ природного походження [1]. Подібні групи швидкостей спостерігалися нами і раніше [5, 13].

Під час негативних іоносферних бур, як відомо, концентрація електронів Ny F-області іоносфери може зменшуватися до 10 разів. При цьому радіохвилі з частотою понад 3 МГц перестають відбиватися від іоносфери. Для дослідження ефектів стартів ракет слід використовувати радіохвилі з частотою 1.5...2 МГц. Під час позитивних іоносферних бур значення N y F-області іоносфери, навпаки, збільшуються до 2...5 разів. Для зондування іоносфери ефективними є радіохвилі з частотою 3...6 МГц. При цьому менша частота відбивається від E-області, а більша від F-області іоносфери.

Для охоплення всіх можливих геофізичних станів іоносфери рекомендується одночасно використовувати низку частот у діапазоні від 1.5...2 до 4...6 МГц.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

1. Встановлено, що виявлення реакції іоносфери на віддалений на відстань порядку 2000 км старт і політ великої ракети на фоні геокосмічної бурі допплерівським методом зазвичай можливе при індексі $K_{pmax} \leq 5$, а при більших його значеннях воно дуже ускладнене або взагалі неможливе.

2. Продемонстровано, що у ряді випадків визначення реакції виявляється ускладненим навіть при значенні індексу $K_{pmax} = 4$.

3. Обґрунтовано, що для підвищення надійності виявлення реакції на старт і політ ракети допплерівський радар повинен одночасно працювати на низці частот у діапазоні від 1.5...2 до 4...6 МГц.

4. Підтверджено реєстрацію декількох груп горизонтальних позірних швидкостей поширення збурень: 1.7...3 км/с і більше, 700...1000, 300...700, 150...260 м/с.

Роботу виконано за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера». Робота також частково підтримувалась у рамках держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0121U109881, 0121U109882 та 0122U001476).

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Госсард Э. Э., Хук У. Х. Волны в атмосфере. Москва: Мир, 1978. 532 с.
- 2. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полета ракеты «Протон»: результаты вертикального зондирования. *Космічна наука і технологія.* 2010. **16**, № 3. С. 15–21. https://doi.org/10.15407/knit2010.03.015
- 3. Живолуп Т. Г., Черногор Л. Ф. Ионосферные эффекты в течение полетов ракеты «Союз» в спокойных и магнитовозмущенных условиях. *Космічна наука і технологія*. 2010. **16**, № 3. С. 22—31. https://doi.org/10.15407/knit2010.03.022
- 4. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме*. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 135 с.
- 5. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография.* Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
- Черногор Л. Ф. О возможном воздействии запусков ракетно-космической техники на магнитное поле Земли. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую природную среду. Под общей ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, М. В. Сильникова. Москва: ГЕОС, 2016. С. 483—520.
- 7. Черногор Л. Ф., Домнин И. Ф. *Физика геокосмических бурь: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины, 2014. 408 с.
- 8. Черногор Л. Ф., Живолуп Т. Г. Сравнительный анализ ионосферных эффектов в течение полетов ракеты «Протон» при различных состояниях космической погоды. *Радиофизика и радиоастрономия*. 2011. **16**, № 4. С. 394—403.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2022. Т. 28. № 3

- 9. Чорногор Л. Ф. Статистичні характеристики геомагнітних бур у 24-му циклі сонячної активності. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. **37**, № 4. С. 49—59. https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.049.
- 10. Чорногор Л. Ф. Фізика геокосмічних бур. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 1 (128). С. 3—77. https://doi. org/10.15407/knit2021.01.003.
- Чорногор Л. Ф., Голуб М. Ю., Luo Y. Статистика геомагнітних бур протягом циклу сонячної активності (2009— 2020 рр.). Вісник Харків. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Сер. Радіофізика та електроніка. 2020. 33. С. 69—77. https:// doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-06.
- 12. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую природную среду: Справочное пособие. Под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. Москва: Анкил, 2000. 640 с.
- 13. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 542 c.
- 14. Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. *Радиофизика и радиоастрон*. 1998. **3**, № 2. C. 181–190.
- 15. Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy*. 1999. **39**, № 1. P. 69–75.

REFERENCES

- 1. Gossard E. E., Hook W. H. (1975). Waves in the Atmosphere. Amsterdam: Elsevier.
- 2. Zhivolup T. G., Chernogor L. F. (2010). Ionospheric effects during rocket «Proton» flight: results of vertical sounding. *Space Science and Technology*, **16**, № 3, 15–21. https://doi.org/10.15407/knit2010.03.015
- 3. Zhivolup T. G., Chernogor L. F. (2010). Ionospheric effects during flights of the rocket «Soyuz» under magnetically quiet and magnetically disturbed conditions. *Space Science and Technology*, **16**, № 3, 22–31. https://doi.org/10.15407/ knit2010.03.022
- 4. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. (1982). *The physics of slow MHD waves in the ionospheric plasma*. Moscow: Energoatomizdat [in Russian].
- 5. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Engine Burn: Monograph.* Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian]
- 6. Chernogor L. F. (2016). Possibility Action of Rocket and Space Engineering Launches on Earth's Magnetic Field. *Rocket's environmental impact*. Eds V. V. Adushkin, S. I. Kozlov, M. V. Sil'nikov. Moscow: GEOS, 483–520 [in Russian].
- 7. Chernogor L. F., Domnin I. F. (2014). *Physics of geospace storms: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, Institute of Ionosphere NAS and MES of Ukraine [in Russian]
- 8. Chernogor L. F., Zhivolup T. G. (2012). Comparative analysis of ionospheric effects as observed during «Proton» rocket flights under different space weather conditions. *Radio Phys. Radio Astron.*, **3** (2), 139–148.
- 9. Chernogor L. F. (2021). Statistical characteristics of geomagnetic storms in the 24th cycle of solar activity. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **37** (4), 49–59. https://doi.org/10.15407/kfnt2021.04.049.
- 10. Chernogor L. F. (2021). Physics of geospace storms. *Space Science and Technology*, **27**, № 1 (128), 3–77. https://doi. org/10.15407/knit2021.01.003.
- Chornogor L. F., Holub M. Yu., Luo Y. (2020). Statistical characteristics of geomagnetic storm activity during solar cycle 24, 2009–2020. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Phys. and Electronics, 33, 69–77. https:// doi.org/10.26565/2311-0872-2020-33-04.
- 12. *The environmental problems and the risks of rocket-space technology impact on the natural environment: Handbook*. (2000). Eds V. V. Adushkin, S. I. Kozlov, A. V. Petrov. Moscow: Ankil Publ. [in Russian].
- 13. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2013). *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group.
- Chernogor L. F., Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M. (1998). Perturbations in the ionosphere following U.S. powerful space vehicle launching. *Radio Phys. Radio Astron.*, 3 (2), 181–190.
- Garmash K. P., Kostrov L. S., Rozumenko V. T., Tyrnov O. F., Tsymbal A. M., Chernogor L. F. (1999). Global disturbances of the ionosphere caused by a rocket launch against the background of a magnetic storm. *Geomagnetism and Aeronomy*, **39** (1), 69–75.

Стаття надійшла до редакції	29.03.2022	Received 29.03.2022
Після доопрацювання	29.03.2022	Revised 29.03.2022
Прийнято до друку	26.04.2022	Accepted 26.04.2022

Y. Luo, Postgraduate
ORCID ID: 0000-0002-3376-5814
E-mail: yiyangluo@163.com
L. F. Chernogor, Head of the Department, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com
Y. H. Zhdanko, Junior Researcher, Postgraduate
ORCID ID: 0000-0002-4612-4194
E-mail: eugenezhd@gmail.com

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

IONOSPHERIC EFFECTS FROM ROCKET LAUNCHES AGAINST THE BACKGROUND OF GEOSPACE STORMS

Ionospheric effects accompanying launches and maneuvering system thruster firings of large rockets have been studied for about 60 years. Fairly complete and adequate models of generation and propagation of disturbances, which are caused by launches and maneuvering system thruster firings of large rockets in the Earth–atmosphere–ionosphere–magnetosphere (EAIM) system, are absent at present. It turns out a number of physical effects during ionospheric storms and rocket launches are similar. Therefore, the presence of ionospheric storm significantly complicates the search for the ionospheric response to the spacecraft launches.

The aim of this study is to describe the results of observation of the ionospheric processes that accompanied rocket launches and maneuvering system thruster firings against the background of ionospheric storms. To analyze the measurements, observational data of the state of the ionosphere before, at the time, and after *Soyuz* and *Proton* rocket launches from the Baikonur cosmodrome (the Republic of Kazakhstan) were used. Observations were made at the Radiophysical Observatory of V. N. Karazin Kharkiv National University (near Kharkiv city, Ukraine). The Doppler vertical sounding radar was used for the measurements. Observations were made during solar cycle 24 (2009–2021). The number of the Soyuz rocket launches is 81, and 53 launches of the Proton rocket.

Identification of the ionospheric response to the launch and maneuvering system thruster firings of a large rocket 2000 km away from the observation site against the background of a geospace storm by the Doppler method is usually possible at $K_{pmax} \le 5$, and at its larger values is very complicated or even impossible. In a number of cases, even though $K_{pmax} = 4$ the determination of the ionospheric response is complicated. To increase the detection reliability of the response to the launch and maneuvering system thruster firings of the rocket, the Doppler radar has to operate on a number of frequencies in the frequency range from 1.5...2 to 4...6 MHz. The existence of several groups of horizontal apparent speeds of disturbance propagation is confirmed: 1.7...3 km and more, 700...1000, 300...700, 150...260 m/s.

Keywords: rocket launch, ionospheric effect, magnetic storm, ionospheric storm, aperiodic disturbance, quasiperiodic disturbance, time delay, apparent speed.

Космічна геоінформатика та геодезія

Space Geoinformatics and Geodesy

https://doi.org/10.15407/knit2022.03.086 УДК 528.946

А. Р. СОГОР, канд. техн. наук, доцент, доцент **П. М. ЗАЗУЛЯК,** д-р фіз.-мат. наук, проф., проф.

Національний університет «Львівська Політехніка» вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013

КАРТОГРАФУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ МІСТА ЛЬВІВ

Сьогодні стан повітря у великих містах України, зокрема у місті Львів, перебуває на незадовільному рівні. Основними проблемами у цій сфері є прогресуючий характер негативного впливу на екологічний стан довкілля та здоров'я людей. Оскільки на даний час немає жодного інтерактивного картографічного матеріалу, який може візуалізувати проблему екологічного забруднення, головною метою цієї роботи було створення інтерактивної карти забруднення повітря м. Львів. Для досягнення цієї мети нами було зібрано та систематизовано геопросторові статистичні картографічні матеріали щодо екологічного стану повітря м. Львів. Визначено необхідне програмне забезпечення для розробки інтерактивної карти забруднення повітря та вивчено його можливості. Розроблено алгоритм завантаження геопросторових даних у створюваний вебресурс. Підібрано шаблон аплікацій для створення карт забруднення повітря м. Львів за показниками 2020 р., які вимірювалися на 30 перехрестях міста. Таким чином, було розроблено дві інтерактивні карти забруднення повітря м. Львів. Львів осторивни карти забруднення повітря м. Львів. Таким чином, було розроблено дві інтерактивні карти забруднення повітря м. Львів листа. Таким чином, було розроблено дві інтерактивні карти забруднення повітря м. Львів у середовищі «Google My Maps» та «ArcGIS Online».

Ключові слова: картографування, геопросторові дані, екологічне картографування, забруднення повітря, інтерактивна карта, ArcGIS Online, Google My Maps, Microsoft Office Excel, Shapefile.

вступ

Прогресуюче забруднення навколишнього природного середовища висуває нові вимоги до системи пріоритетів економічного зростання, змушує світову спільноту замислитися про майбутнє людської цивілізації та її місце у навколишньому середовищі. Загалом під якістю навколишнього природного середовища необхідно розуміти його здатність виконувати у довгостроковій перспективі функції середовища проживання і життєдіяльності людини, а також джерела збереження генофонду і біологічного різноманіття. Передумовою збереження та гармонізації природного середовища є ефективна екологічна політика, без чого неможливе покращення якості життя населення [1].

Повітря — один з основних життєво важливих елементів навколишнього природного середовища, який є необхідною фізичною і біологічною умовою існування людини та джерелом життя на Землі. Від його якості залежить здоров'я людини. Повітря також має важливе економічне значення. Воно використовується як сировина для хімічної промисловості, енергетичний ресурс, середовище зв'язку і руху літальних апаратів, для скидання відходів виробництва тощо.

Цитування: Согор А. Р., Зазуляк П. М. Картографування екологічного забруднення повітря міста Львів. *Космічна* наука і технологія. 2022. **28**, № 3 (136). С. 86—91. https://doi.org/10.15407/knit2022.03.086

Водночас на стан та склад повітря впливають два головні фактори: внесення в атмосферу забруднювальних речовин через різноманітні джерела і шкідливий фізичний вплив на нього. До останнього належать випромінювання, звукові коливання, шум тощо. Ці та інші фактори порушують оптимальний стан повітря, що негативно впливає на здоров'я людей, на стан і розвиток тварин і рослин.

Основними джерелами забруднювальних речовин у повітрі міста Львів є: пилу — автотранспорт, деревообробна промисловість і промисловість будматеріалів; діоксиду сірки — промислові підприємства, оксиду вуглецю — автотранспорт, підприємства теплоенергетики; діоксиду азоту — підприємства теплоенергетики; формальдегіду — автотранспорт, деревообробна промисловість.

На сьогодні викиди від пересувних джерел є найбільшими забруднювачами повітря у місті. Хімічний склад викидів від пересувних джерел забруднення характеризується перевагою вмісту оксиду вуглецю (до 74 %), сполук азоту та вуглеводнів (відповідно 12 % та 11 %) [5, 6].

Аналіз сучасних наукових публікацій показав, що проблема екологічного забруднення потребує значної уваги та детального вивчення, оскільки негативні зміни у природі впливають на навколишнє середовище та на умови існування усього людства. Саме інтерактивним картографуванням або вебкартографуванням можна наочно відобразити екологічну якість навколишнього середовища та зробити певні висновки. Створення екологічних карт Львівщини показано у працях [2—4, 7—10].

На даний час стан повітря у великих містах України, зокрема у місті Львів, перебуває на незадовільному рівні. Основними проблемами у цій сфері є прогресуючий характер негативного впливу на екологічний стан довкілля та здоров'я людей.

Головною метою цієї роботи є створення інтерактивної карти екологічного забруднення повітря міста Львів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Сумарний викид забруднювальних речовин від стаціонарних і пересувних джерел міста Львів

становить 46.7 тис. т (61.42 кг на одного мешканця, в області — 99.6 кг), при цьому 96 % від нього припадає на пересувні джерела забруднення (автомобільний, авіаційний та залізничний транспорт). Серед стаціонарних джерел забруднення міста найвищий відсоток припадає на підприємства теплоенергетичного комплексу міста (близько 40 %), що є загальнодержавною тенденцією [5].

Викиди від стаціонарних джерел забруднення на 90 % зумовлені діяльністю понад 600 різногалузевих промислових підприємств. Підприємства енергетики є найбільшими стаціонарними джерелами забруднень атмосферного повітря у Львові. Це спеціалізовані комунальні теплопостачальні підприємства: ТЕЦ-1, ТЕЦ-2, а також ЛМКП «Львівтеплоенерго» і ЛКП «Залізничнетеплоенерго», які виробляють понад 90 відсотків всієї теплової енергії у місті. На балансі цих підприємств перебуває 129 котелень, ТЕЦ ЛМКП «Львівтеплоенерго», ТЦ «Північна» та ТЦ «Південна», 150 ЦТП і 563.15 км теплових мереж. У розрізі районів міста на балансі означених вище теплокомунальних підприємств найбільшу кількість котелень локалізовано у Галицькому районі — 63, найменшу — у Сихівському районі — 5 (вони обслуговують практично однакову кількість будинків — близько 500, але для останнього характерною є багатоповерхова забудова). Паливом для виробництва теплової енергії є природний газ, об'єми використання якого у 2010 році становили 636.7 млн. куб. м (населення — 38 %, комунальні потреби — 50 %, підприємства — 12 %). Використання зрідженого газу і надалі є незначним та становить 566 т/рік [6].

Одним з основних факторів, який впливає на рівень забруднення повітря пересувними джерелами, є якість пального. Пріоритетними питаннями залишаються: зменшення навантаження автотранспорту на центральну частину міста через реалізацію нової транспортної стратегії; контроль за станом хімічного забруднення атмосфери не лише у точках перетину магістральних вулиць, але і у межах селітебних територій, особливо дитячих майданчиків, садочків та шкіл; подальша модернізація теплоенергетичного господарства міста; завершення розробки проекту «Реконструкція автоматизованої системи керування рухом»; бріо- та ліхеноіндикаційні дослідження стану забруднення повітря у місті тощо [5].

Екологічний моніторинг стану та забруднювачів повітря у Львівській області у І та ІІ кварталі 2020 р. здійснював Львівський регіональний центр з гідрометеорології. Інформацію про результати досліджень показників стану забруднення повітря м. Львів надано КП «Адміністративно-технічне управління» Львівської міської ради.

Оцінювання стану атмосферного повітря у місті Львів у І та II кварталі 2020 року здійснювалось шляхом порівняння середніх концентрацій забруднювальних речовин з відповідними середньодобовими гранично допустимими концентраціями (далі — ГДК) та порівняння максимально разових концентрацій пріоритетних забруднювальних речовин з їхніми відповідними максимальними разовими гранично допустимими концентраціями (далі — ГДК м.р.). Пріоритетними забруднювальними речовинами (ЗР) вважались ті речовини, які вносили найбільший внесок в забруднення атмосферного повітря міста і контролювались на більшості стаціонарних постів спостережень за забрудненням повітря [5, 6].

Перелік пріоритетних забруднювальних речовин наведено у таблиці згідно з ГДК та класом небезпеки, де значення класу небезпеки забруднювальної речовини зменшується відповідно до підвищення її небезпечності.

Значення ГДК забруднюючих речовин атмосферного повітря

Забруднювальна речовина	ГДК середньо- добова, мг/м ³	Клас небезпеки
Пил (завислі речовини)	0.15	3
Діоксид сірки	0.05	3
Оксид вуглецю	3.0	4
Діоксид азоту	0.04	2
Оксид азоту	0.06	3
Формальдегід	0.003	2



Рис. 1. Середньомісячні концентрації ЗР у квітні 2020 та 2019 роках

У І та II кварталі 2020 року систематичні спостереження за вмістом шкідливих речовин у повітрі міста провадилися лабораторією спостереження за забрудненням повітря (СЗА) Львівського регіонального центру з гідрометеорології на чотирьох стаціонарних постах (ПСЗ) з періодичністю відбору чотири рази на добу шість днів на тиждень. Визначалися сім забруднювальних домішок, з них основні — пил (завислі речовини), діоксид сірки, оксид вуглецю та діоксид азоту. До специфічних домішок належать: оксид азоту, фтористий водень та формальдегід. Аналіз проб по всіх цих речовинах проводився лабораторією СЗА. Також здійснювалось визначення рН опадів. Крім цього, відбиралися проби на визначення у повітрі вмісту бензапірену та важких металів. Аналіз цих проб провадився централізовано по Україні спеціалізованими лабораторіями: на бензапірен — лабораторією Донецького ЦГМ, на важкі метали — лабораторією ЦГО м. Київ. Адреси стаціонарних постів спостереження у м. Львові [5, 6]:

1. Пост 0401 — вул. Юнаківа.

2. Пост 0303 — вул. Городоцька 211.

- 3. Пост 0704 вул. Соборна 11.
- 4. Пост 0808 вул. Зелена 301.

Наприклад, у квітні 2020 року перевищення максимальних разових ГДК не спостерігалося. По середньомісячних концентраціях при порів-



Рис. 2. Карта забруднення атмосферного повітря міста Львів у середовищі «Google My Maps»

нянні із середньодобовими ГДК у цьому місяці межу ГДК перетинає пил, діоксид азоту та формальдегід. Порівняно із квітнем 2019 року спостерігається збільшення середньомісячних концентрацій пилу; зменшення — оксиду вуглецю, діоксиду азоту та оксиду азоту. Концентрація діоксиду сірки, фтористого водню та формальдегіду не змінилася. По максимальних концентраціях відзначаємо зниження вмісту оксиду вуглецю, діоксиду сірки, діоксиду азоту, оксиду азоту, фтористому водню та формальдегіду [6].

Порівнявши середньомісячні концентрації забруднювальних речовин у повітрі м. Львів у квітні 2020 року із квітнем 2019 року пере спостерігаємо їхнє збільшення із часом (рис. 1).

Лабораторія КП «Адміністративно-технічне управління» Львівської міської ради проводила заміри для визначення якості повітря на території м. Львів по таких показниках, як рівні оксиду вуглецю, оксиду азоту, діоксиду азоту, сірчистого ангідриду. Протягом I та II кварталу 2020 року проведено 30 контрольних замірів на 30 перехрестях м. Львова. Спостерігається перевищення забруднення ГДК по оксиду вуглецю на 12 перехрестях та діоксиду азоту на 10 перехрестях [5, 6].

Для створення інтерактивної карти ми скористалися досить зручною та популярною платформою «Google My Maps». Для того щоб розпочати роботу в обраній платформі, необхідно зібрати і структурувати дані у середовищі «Microsoft Office Excel».

Для нашого випадку було розроблено *Excel*таблиці замірів якості повітря м. Львів, які проводила лабораторія КП «Адміністративно-технічне управління» Львівської міської ради. З цією метою було взято до уваги показники І та II кварталу 2020 р., які вимірювалися на 30 перехрестях міста.

Для візуалізації карти міста Львів було використано карту «*OpenStreetMap*» у платформі «*Google My Maps*» з межами міста та межами районів міста.

Для нанесення наших даних на карту спочатку за допомогою середовища «Google My Maps» було створено карту із визначеними координатами кожного перехрестя та значеннями забруднювачів повітря. Для цього ми експортували створену нами таблицю *«Microsoft Office Excel»* у середовище *«Google My Maps»*.

Після дій, виконаних вище, ми об'єднуємо карту з межами міста та карту забруднювачів повітря і отримуємо нашу інтерактивну карту (рис. 2).

Для порівняння ми створили карту у середовищі «*ArcGIS Online*», яка підтвердила результати, отримані на рис. 2.

висновки і пропозиції

Таким чином, досліджуючи проблему екологічного забруднення повітря м. Львів, можна констатувати таке.

• Найбільша концентрація забруднювальних речовин у повітрі зосереджена у центральній частині м. Львів.

• Спостерігається максимальне перевищення забруднення повітря м. Львів формальдегідом, спричинене автотранспортом.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Лібанова Е. М., Гладун О. М., Лісогор Л. С. та ін. *Вимірювання якості життя в Україні*. Аналітична доповідь. Київ, 2013. 48 с.
- 2. Согор А. Р., Голубінка Ю. І., Шаповал В. В., Согор М. А. Інтерактивна карта забруднення поверхневих вод Львівщини. *Молодий вчений*. 2020. № 2 (78). С. 193—199.
- 3. Согор А. Р., Ярема Н. П., Бридун А. М., Лех I. П. Створення інтерактивної карти забруднення атмосферного повітря Львівщини. *Молодий вчений*. 2019. № 2 (66). С. 303—306.
- 4. Согор А. Р., Ярема Н. П., Геба М. С., Серант О. В. Створення екологічних карт Львівщини за даними моніторингу атмосферного повітря. *Молодий вчений*. 2018. № 6 (58). С. 23—27.
- Стан довкілля у Львівській області (за результатами моніторингових досліджень). Інформаційно-аналітичний огляд. І квартал 2020 року. Львів: Департамент екології та природних ресурсів Львівської обласної державної адміністрації, 2020. 25 с. URL: https://deplv.gov.ua/potochni-rezultaty/ (дата звернення 07.06.2022).
- Стан довкілля у Львівській області (за результатами моніторингових досліджень). Інформаційно-аналітичний огляд. ІІ квартал 2020 року. Львів: Департамент екології та природних ресурсів Львівської обласної державної адміністрації, 2020. 31 с. URL: https://deplv.gov.ua/potochni-rezultaty/ (дата звернення 07.06.2022).
- Ярема Н. П., Марко Т. Б. Забруднення навколишнього природного середовища твердими побутовими відходами на прикладі Львівської області. Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції (Івано-Франківськ, 22—25 березня 2017 р.). Івано-Франківськ, 2017. С. 369—370.
- 8. Ярема Н. П., Марко Т. Б., Лозинський В. А. *Картографування забруднення навколишнього природного середовища Львівщини твердими побутовими відходами*. GeoTerrace-2016: матеріали міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених (Львів, 15—17 грудня 2016 р.). Львів, 2016. С. 166—167.
- Ярема Н. П., Полюхович Ю. М., Кубрак О. Д., Серант О. В. Створення інтерактивної карти сміттєзвалищ Львівської області. Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні, лісовпорядкуванні та природокористуванні: матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції (Ужгород, 4—6 жовтня 2018 р.). Ужгород, 2018. С. 119—123.
- 10. Ярема Н. П., Серант О. В., Кубрак О. Д., Терех Т. М. Веб-картографування сміттєзвалищ Львівської області. *Молодий вчений*. 2019. № 11 (75). С. 167—171.

REFERENCES

- 1. Libanova E. M., Hladun O. M., Lisohor L. S., et al. (2013) *Measuring the quality of life in Ukraine / Analytical report*, Kyiv. (in Ukrainian)
- Sohor A. R., Holubinka Yu. I., Shapoval V. V., Sohor M. A. (2020) Interactive map of surface water pollution in Lviv region. Molodyi vchenyi, № 2 (78), 193–199.
- 3. Sohor A. R., Yarema N. P., Brydun A. M., Lekh I. P. (2019) Creating an interactive map of air pollution in Lviv region. *Molodyi vchenyi*, № 2 (66), 303–306.
- 4. Sohor A. R., Yarema N. P., Heba M. S., Serant O. V. (2018) Creation of ecological maps of Lviv region according to atmospheric air monitoring. *Molodyi vchenyi*, № 6 (58), 23–27.
- 5. State of the environment in Lviv region (according to the results of monitoring studies). I quarter of 2020. (2020). Lviv: Department of Ecology and Natural Resources of Lviv Regional State Administration. URL: https://deplv.gov.ua/potochni-rezultaty/ (Last accessed 07.06.2022) (in Ukrainian)

- State of the environment in Lviv region (according to the results of monitoring studies). II quarter of 2020. (2020). Lviv: Department of Ecology and Natural Resources of Lviv Regional State Administration. URL: https://deplv.gov.ua/potochni-rezultaty/ (Last accessed 07.06.2022) (in Ukrainian)
- Yarema N. P., Marko T. B. (2017). Pollution of the natural environment with solid household waste by the example of Lviv region. Proc. Ekoheoforum 2017. Aktualni problemy ta innovatsii: Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (Ukraine, Ivano-Frankivsk, March 22–25, 2017). Ivano-Frankivsk, 369–370.
- Yarema N. P., Marko T. B., Lozynskyi V. A. (2016). *Mapping of environmental pollution of the Lviv region with solid household waste*. Proc. GeoTerrace-2016: Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia molodykh vchenykh (Ukraine, Lviv, December 15–17, 2016). Lviv, 166–167.
- Yarema N. P., Poliukhovych Yu. M., Kubrak O. D., Serant O. V. (2018). *Creating an interactive map of landfills in Lviv region*. Proc. Novi tekhnolohii v heodezii, zemlevporiadkuvanni, lisovporiadkuvanni ta pryrodokorystuvanni: Materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (Ukraine, Uzhhorod, October 4–6, 2018). Uzhhorod, 119–123.
- 10. Yarema N. P., Serant O. V., Kubrak O. D., Terekh T. M. (2019). Web-mapping of landfills in Lviv region. *Molodyi vchenyi*, № 11 (75), 167–171.

Стаття надійшла до редакції	07.06.2022
Після доопрацювання	07.06.2022
Прийнято до друку	07.06.2022

A. R. Sohor, Ph. D. in Tech, Associate Professor, Associate Professor *P. M. Zazuliak*, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor, Professor

Lviv Polytechnic National University

12, Bandery Str., Lviv, 79013 Ukraine

MAPPING OF ENVIRONMENTAL POLLUTION OF AIR IN LVIV

The condition and composition of air in Lviv are influenced by two main factors: the introduction of pollutants into the atmosphere through various sources and harmful physical effects on it. The latter includes radiation, sound vibrations, noise, and so on. These and other factors disrupt the optimal conditions of the air, which negatively affects human health and the condition and development of animals and plants. The main sources of pollutants in the air of Lviv are as follows: dust - vehicles, woodworking and building materials industry; sulfur dioxide — industrial enterprises, carbon monoxide — vehicles, thermal power plants; nitrogen dioxide — heat power companies; formaldehyde — motor transport, woodworking industry. Today, emissions from mobile sources are the biggest air pollutants in the city. The chemical composition of emissions from mobile sources of pollution is characterized by the predominance of carbon monoxide (up to 74 %), nitrogen compounds, and hydrocarbons (12 % and 11 %, respectively). Today the state of atmospheric air in large cities of Ukraine and, in particular, in the city of Lviv is at an unsatisfactory level. The main problems in this area are the progressive nature of the negative impact on the ecological state of the environment and human health. As there is currently no interactive cartographic material that can visualize the problem of environmental pollution, the main purpose of this work was to create an interactive web map of the quality of life of the population of Lviv in terms of air pollution. To achieve this goal, we collected and systematized geospatial statistical cartographic materials on the ecological conditions of the air in Lviv. The necessary software for the development of an interactive map of air pollution has been selected, and its possibilities have been studied. An algorithm for loading geospatial data into the created web resource has been developed. A template of applications for creating web maps of air pollution in Lviv was selected according to the indicators of 2020, which were measured at 30 crossroads of the city. Thus, two interactive web maps of air pollution in Lviv were developed in the environment «Google My Maps» and «ArcGIS Online».

Keywords: mapping, geospatial data, ecological mapping, atmospheric pollution, interactive map, ArcGIS Online, Google My Maps, Microsoft Office Excel, Shapefile.

Received 07.06.2022

Revised 07.06.2022

Accepted 07.06.2022

ОСНОВНІ ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ І ПОДАННЯ РУКОПИСІВ ДО ЖУРНАЛУ «КОСМІЧНА НАУКА І ТЕХНОЛОГІЯ»

Рукописи приймаються українською або англійською мовою. Для подання рукопису авторам необхідно надіслати на адресу редакції такі документи:

- 1. Дві тверді копії оригіналу, одна з яких підписана всіма авторами. Копії друкуються в одну колонку на одному боці аркушів паперу кеглем 12–14 з інтервалом 1.5 чи більше.
- 2. Електронні копії рукопису.
- 3. Направлення на бланку установи, де виконано роботу, підписане її керівником.
- 4. Ліцензійна угода (бланк угоди є на сайті space-scitechjournal.org.ua)

Адреса редакції:

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

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

Рукопис повинен бути оформлений згідно із Правилами для авторів (див сайт space-scitechjournal.org.ua). Послідовність подачі матеріалу така:

- Номер УДК.
- Ініціали та прізвища авторів, короткі дані про авторів (посада, науковий ступінь, звання, нагороди тощо).
- Установи, де працюють автори (офіційні назви), поштові та електронні адреси.
- Назва рукопису.
- Два резюме українською та англійською мовами. Кожне резюме повинне містити: список авторів, список установ, де вони працюють, з повними адресами, назву рукопису, текст резюме, ключові слова. Об'єм кожного резюме не менш ніж 1800 знаків з пробілами.
- Текст рукопису.
- Список літератури, упорядкований у **алфавітному порядку**. Посилання по тексту робляться у квадратних дужках (наприклад [3, 17]).
- References це копія списка літератури, перекладена англійською мовою (правила оформлення див. на сайті space-scitechjournal.org.ua).
- Контактні особи, телефони, e-mail.

Рисунки повинні бути чіткими, контрастними і переважно чорно-білими. Із колірних зображень публікуються лише ті, без яких виклад матеріалу зазнає суттєвого збіднення. На графіках не повинно бути лишніх деталей — рамок, координатних сіток, пояснювальних написів. Різні залежності зображаються не кольором, а лініями чорного кольору різного накреслення (суцільна, штрихова, пунктир, штрих-пунктир тощо) або нумеруються арабськими цифрами. Пояснення кривих, значків, легенди, експлікації даються у підрисункових підписах. Координатні осі підписуються не словами, а простими ідентифікаторами. Обов'язково вказується фізична величина та її одиниці вимірювань у системі СІ.

Таблиці нумеруються згідно з їхньою появою в тексті та мають заголовки.

Рукописи, оформлені без урахування Правил для авторів, не розглядаються.