

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

3MICT

Космічна навігація та зв'язок

<i>Петляк О. А., Марченко В. Т.</i> Про один із підходів до оцінки технічного рівня геостаціонарних супутни- ків зв'язку Космічні матеріали та технології	5
Манько Т. А., Гусарова І. О., Потапов О. М., Солод- кий Є. В. Вплив наномодифікаторів на властивості вуглекомпозитів	15
Одайский С. А., Потапов А. М., Федоренко С. В., Щу- дро А. П., Кулик А. С. Спосіб виготовлення труб з по- лімерних композиційних матеріалів для конструк- цій літальних апаратів	22
Дзюба А. П., Сіренко В. М., Клименко Д. В., Левиті- на Л. Д., Черенков Д. А. Оптимізація композитних оболонок обертання методами теорії оптимальних процесів	28
Дослідження Землі з космосу	
Федоровський О. Д., Зуб Л. М., Дьяченко Т. М., Том- ченко О. В., Хижняк А. В., Якимчук В. Г. Дистанційне оцінювання екологічного стану водойм на основі багатовимірної щільності розподілу площ біотопів	

CONTENTS

Space Navigation and Communications

5	<i>Petlyak E. A., Marchenko V. T.</i> About one of the approaches to the assessment of the technical level of geostationary communication satellites			
	Space Materials and Technologies			
15	<i>Manko T., Husarova I., Potapov O., Solodkii Ye.</i> Influence of nanomodifiers on the properties of carbon composites	15		
22	<i>Odaisky S., Potapov O., Fedorenko S., Shchudro A., Ku-</i> <i>lik A.</i> A method of manufacturing pipes from polymer composite materials for aircraft structures	22		
28	<i>Dzyuba A. P., Sirenko V. N., Klymenko D. V., Levyti- na L. D., Cherenkov D. A.</i> Optimization of composite revolution shell by methods of theory of the optimal pro- cesses	28		
	Study of the Earth from Space			
38	Fedorovsky A. D., Zub L. N., Dyachenko T. N., Tomchen- ko O. V., Khyzhniak A. V., Yakymchuk V. H. Remote as- sessment of the ecological state of water bodies based on the multidimensional density distribution of biotope ar- eas on the example of the Kyiv reservoir	38		

на прикладі Київського водосховища.....

Покалюк В. В., Ломакін І. Е., Верховцев В. Г. Балтій- сько-Іранський суперлінеамент — довгоживучий трансєвразійський пояс дислокацій і планетарної мегатріщинуватості		Pokalyuk V. V., Lomakin I. E., Verkhovtsev V. G. Baltic- Iranian super lineament — long-lived trans-eurasian belt of dislocations and planetary megafractures		
Астрономія й астрофізика		Astronomy and Astrophysics		
<i>Білик А. С., Гребенєва І. В.</i> Особливості проєктування споруд в умовах Марса	73	<i>Bilyk A., Hrebenieva I.</i> Features of the design of structures in the conditions of Mars	73	
Васильєва І. Е. Чи є зв'язок між сонячною активніс- тю та землетрусами?	90	<i>Vasylieva I. E.</i> Is there any connection between solar activity and earthquakes?	90	

На першій сторінці обкладинки — Карти розподілу основних типів біотопів верхів'я Київського водосховища, отримані за матеріалами дешифрування КА «Landsat» (див. статтю *О. Д. Федоровського та ін.*, С. 38—47).

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 та геологічних 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 24.11.2020. Формат 84 × 108/16. Гарн. Ньютон. Ум. друк. арк. 10,71. Обл.-вид. арк. 11,25. Тираж 101 прим. Зам. № 6147.

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

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



СЛОВО ПРО БОРИСА ЄВГЕНОВИЧА ПАТОНА

19 серпня 2020 року на 102-му році життя відійшов у Вічність видатний вчений та непересічна особистість XX—XXI ст., Президент НАН України, академік НАН України Борис Євгенович Патон.

З іменем Б.Є. Патона нерозривно пов'язане становлення світової і національної ракетно-космічної галузі та виконання проривних наукових досліджень у космосі. З його ініціативи були здійснені пріоритетні космічні експерименти зі зварювання, матеріалознавства, біології та дистанційного зондування поверхні Землі.

Борис Євгенович був далекоглядною людиною і добре розумів важливість космічних досліджень для подальшого існування і розвитку людської цивілізації. Людина передової інженерної думки, він високо цінував і підтримував як фундаментальні, так і прикладні напрямки космічної науки.

Борис Євгенович приділяв значну увагу організації космічних досліджень та висвітленню їхніх результатів, зокрема на сторінках науково-практичного журналу «Космічна наука і технологія», головним редактором якого він був з часу заснування.

Світлі спогади про величну людину залишаться у пам'яті всіх, хто знав та мав щасливу нагоду спілкуватись з Борисом Євгеновичем Патоном.

Члени редколегії та редакції



ПАМ'ЯТІ МИХАЙЛА ІВАНОВИЧА МІЩЕНКА (1959—2020)

21 липня 2020 р. раптово зупинилось серце видатного українського та американського вченого Михайла Івановича Міщенка (Michael I. Mishchenko). Протягом восьми років (1984—1992 рр.) Михайло Іванович був нерозривно пов'язаний з Головною астрономічною обсерваторією НАН України, спочатку як аспірант після закінчення Московського фізико-технічного інституту (МФТІ), а після захисту кандидатської дисертації — як науковий співробітник. Але і після від'їзду до США в 1992 р. він продовжував підтримувати тісні зв'язки з ГАО, часто приїздив до Києва, надсилав багато наукової літератури, до останніх днів життя тісно співпрацював з українськими колегами та товаришував з ними.

Михайло Міщенко був непересічним науковцем. Коло його наукових досягнень було надзвичайно широким, від розробки загальної теорії переносу випромінювання в дискретних середовищах безпосередньо з макроскопічних рівнянь Максвелла до розвитку так званого Т-матричного методу розрахунку характеристик розсіяння випромінювання несферичними частинками та написання відповідної комп'ютерної програми, яка широко використовується у світі. Багато уваги Михайло Міщенко приділяв вивченню властивостей розсіяння електромагнітного випромінювання морфологічно складними середовищами та інтерпретації поляриметричних спостережень тіл Сонячної системи, зокрема дослідженню аерозолю в атмосфері Землі. Він розробив алгоритм для визначення властивостей земного аерозолю на основі даних спектрофотополяриметричних спостережень, виконаних на навколоземній орбіті, який ліг в основу розробки інструмента, створеного в рамках космічної місії НАСА «Глорія». На жаль, ця місія зазнала невдачі при запуску. Михайло Іванович був одним з ініціаторів початку в Україні робіт з дослідження властивостей земного аерозолю з використанням спостережень на навколоземній орбіті. Він зробив великий внесок в розробку ідеології і практичну реалізацію створення приладів для виконання української космічної місії «Аерозоль UA».

Михайло Міщенко опублікував 5 монографій та понад 300 статей у наукових журналах, його індекс Хірша в пошуковій системі Scopus дорівнює 70. Він був прискіпливим головним редактором «Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer», входив до редколегій багатьох наукових журналів, зокрема був членом редколегії журналу «Космічна наука і технологія». Протягом багатьох років організував велику кількість наукових конференцій, серед яких дві конференції в Україні у рамках NATO Advanced Study Institute (2003, 2010 рр.). Його науковий внесок було відзначено багатьма міжнародними преміями та нагородами, зокрема Державною премією України в галузі науки і техніки (2010 р.) і премією імені М. П. Барабашова НАН України (1993 р.).

Блискучу наукову кар'єру Михайла Міщенка перервала раптова смерть, але його наукова спадщина ще багато років буде широко використовуватись, а пам'ять про нього назавжди збережеться в серцях його друзів та колег.

Космічна навігація та зв'язок

Space Navigation and Communications

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.005 УДК 629.13

О. А. ПЕТЛЯК¹ нач. сектору E-mail: petlyak@ukr.net **В. Т. МАРЧЕНКО²** наук. співроб. відділу E-mail: office.itm@nas.gov.ua ¹Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008 ² Інститут технічної механіки Національної академії наук України й Державного космічного агентства України вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

ПРО ОДИН ІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ ЗВ'ЯЗКУ

Мета статті — представлення розробленого методичного підходу до кількісної оцінки показника технічного рівня (технічної досконалості) геостаціонарних супутників зв'язку. Показник технічного рівня — кількісна міра оцінки досконалості конструкції виробу і якості продукції (послуг), вироблених з його застосуванням; це один з основних техніко-економічних показників дослідно-конструкторської роботи. Значення показника технічного рівня є одним з визначальних факторів конкурентоспроможності новостворюваної космічної системи.

Розглянуто наявні методичні підходи з кількісної оцінки технічного рівня наукомістких і технічно складних виробів. Описано методичний підхід до визначення складу показників технічної ефективності для розрахунків показника технічного рівня геостаціонарного супутника зв'язку, формальний опис корисного ефекту і логічна схема кількісної оцінки технічного рівня, методичний підхід до розрахунків ступеня впливу часткових показників технічної ефективності на величину корисного ефекту від використання геостаціонарного супутника зв'язку. В основу методичного підходу покладено математичну модель методу аналізу ієрархій Т. Сааті, доповнену моделями авторів для максимально можливого обліку технічних особливостей геостаціонарних супутників зв'язку і забезпечення контролю помилок і протиріч у судженнях експертів, що брали участь у підготовці початкових даних з невимірюваних або важко вимірюваних техніко-економічних показників геостаціонарних супутників зв'язку.

Завдяки високому рівню формалізації процесу кількісної оцінки технічного рівня і застосуванню математичних метоdiв, які використовуються в сучасній теорії прийняття рішень, розроблений методичний підхід дозволяє істотно підвищити якість розрахунків та знизити вплив суб'єктивного фактора при визначенні значення показника технічного рівня. На основі наведеного методичного підходу може бути створено методику кількісної оцінки технічного рівня геостаціонарних супутників зв'язку, що відповідає вимогам сьогодення.

Ключові слова: геостаціонарний супутник зв'язку, кількісна оцінка технічного рівня, космічний апарат, метод аналізу ієрархій, ракетно-космічна техніка.

Цитування: Петляк О. А., Марченко В. Т. Про один із підходів до оцінки технічного рівня геостаціонарних супутників зв'язку. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 5—14. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.005

ВСТУП

Показник технічного рівня (ТР) є одним із основних техніко-економічних показників дослідно-конструкторської роботи (ДКР) зі створення зразків ракетно-космічної техніки (РКТ). Разом з витратами на розробку й експлуатацію виробу РКТ показник ТР визначає конкурентоспроможність нового виробу на світовому ринку ракетно-космічної продукції й послуг. Показник технічного рівня є кількісною мірою оцінки досконалості конструкції виробу і якості виробленої з його застосуванням продукції (послуг).

Відповідно до нормативних документів колишнього СРСР (РК-95 і ГОСТ В15.2003) оцінювання технічного рівня повинне здійснюватися у процесі виконання ДКР як замовником, так і головним розробником виробу РКТ. Замовником — з метою контролю відповідності створюваного зразка РКТ останнім досягненням вітчизняної і закордонної науки й техніки. Головний розробник зобов'язаний періодично проводити розрахунки з оцінки ТР створюваного зразка РКТ, тому що він несе відповідальність не тільки за виконання вимог тактико-технічного завдання (ТТЗ), але й за забезпечення необхідного технічного рівня виробу, що розроблюється.

На практиці замовник виробу РКТ розрахунки з кількісного оцінювання ТР не проводить, а розробники РКТ виконують оцінювання чисто формально з використанням простих прийомів, які застосовуються для оцінки якості споживчої промислової продукції, а отже, результати цих розрахунків не можуть вважатися коректними.

Основною причиною такого стану справ є відсутність в Україні методичного забезпечення для проведення розрахунків з кількісної оцінки ТР виробів РКТ.

1. СУЧАСНІ МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ 3 КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ТР НАУКОМІСТКИХ І ТЕХНІЧНО СКЛАДНИХ ВИРОБІВ

Кількісна оцінка ТР наукомістких і технічно складних виробів, як і раніше, залишається проблемною [1—5, 7]. Така оцінка станом на сьогодні виконується методами експертних оцінок: пряма оцінка — експерти безпосередньо визначають значення показника ТР;

– метод бальних оцінок;

 ранжирування часткових показників технічного рівня;

 – бінарне попарне порівняння окремих показників технічного рівня.

Перераховані методичні підходи досить прості у використанні, однак дають значення показника ТР, що суттєво залежить від суб'єктивних факторів.

Ще у 1980-ті роки у колишньому СРСР виконувалася комплексна науково-дослідна робота (НДР) «Рівень», кінцевою метою якої була розробка методик з оцінки технічного рівня виробів РКТ. Ця робота очолювалися Центральним науково-дослідним інститутом машинобудування (ЦНДІмаш) і 4-м Центральним науково-дослідним інститутом Міністерства оборони (ЦНДІ МО). Розроблені в рамках НДР «Рівень» методичні матеріали не відповідають вимогам сьогоднішнього дня, тому що базувалися на положеннях нормативного документа РД 50-149-79 (Методичні вказівки з оцінки технічного рівня і якості машинобудівної продукції).

В Україні будь-яких матеріалів з оцінки ТР виробів РКТ на даний час немає.

Основним завданням даної статті є виклад розробленого Інститутом технічної механіки НАН України і ДКА України за участі ДП КБ «Південне» методичного підходу до оцінки ТР виробів РКТ, що дозволяє суттєво знизити вплив суб'єктивного фактора на значення показника технічного рівня.

Це досягається за рахунок високого рівня формалізації процесу кількісної оцінки ТР і застосування математичних методів, які використовуються в сучасній теорії прийняття рішень.

Повністю виключити участь експертів можна тільки у випадку, якщо системні аналітики (із проєктантів) зможуть побудувати адекватну функцію корисного ефекту (КЕ), яку можна отримати у процесі експлуатації зразка РКТ, від значень його тактико-технічних характеристик:

KE = Q(TTX).

Числові значення показника технічного рівня створюваного зразка дорівнюють:

а) у випадку, коли базовий зразок РКТ реально існує —

$$k_{\mathrm{TP}_n} = \frac{Q(\mathrm{TTX}_n)}{Q(\mathrm{TTX}_{\mathrm{F}})};$$

б) у випадку, коли базовий зразок є гіпотетичним, тобто його ТТХ визначено як найкращі технічні характеристики із групи розглянутих зразків функціональних аналогів створюваних зразків РКТ —

$$k_{\mathrm{TP}_{n}} = \frac{k_{\mathrm{TP}_{n}}^{*}}{k_{\mathrm{TP}_{\mathrm{B}}}^{*}}, \quad n = \overline{1, N},$$
$$k_{\mathrm{TP}_{n}}^{*} = \frac{Q(\mathrm{TTX}_{n})}{Q(\mathrm{TTX}_{\mathrm{B}})},$$
$$k_{\mathrm{TP}_{\mathrm{B}}}^{*} = \max\left\{\frac{Q(\mathrm{TTX}_{n})}{Q(\mathrm{TTX}_{\mathrm{B}})},\right\}$$

де $Q(\text{TTX}_n)$ — величина корисного ефекту, який можна отримати від експлуатації n-го зразка РКТ, $Q(\text{TTX}_{\text{Б}})$ — величина корисного ефекту при експлуатації базового зразка РКТ, N — число порівнюваних зразків РКТ.

Для зручності створюваному зразку РКТ доцільно присвоїти індекс n = 1. На практиці для переважної більшості зразків РКТ побудувати явну аналітичну функцію Q(TTX) неможливо в силу її нелінійності та наявності факторів невизначеності, а отже, повністю виключити участь експертів у процесі оцінки ТР зразків РКТ неможливо.

Стратегічна важливість і особливості РКТ (наукоємність, висока технологічність, висока технічна складність, функціонування в умовах космічного простору, неремонтоздатність, дуже висока вартість ДКР і т. п.) обумовлюють необхідність розробки нового методичного підходу до оцінки технічного рівня створюваних виробів РКТ. Новий методичний підхід повинен забезпечувати істотне зниження впливу суб'єктивного фактора на значення показника ТР створюваної РКТ.

Як показує досвід, для такого класу завдань зниження впливу суб'єктивного фактора на кінцеві результати можна добитися тільки шляхом максимально можливої формалізації процесу розв'язку завдання, а саме: дати розглянутому завданню чітке математичне формулювання;

 – описати кожний етап розв'язку завдання в термінах абстрактних математичних структур;

 – звести участь експертів тільки в частині підготовки невимірюваних або важко вимірюваних початкових даних, які необхідні для проведення розрахунків;

 реалізувати автоматичний логіко-математичний контроль наявності помилок або протиріч у судженнях експертів.

2. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Задано:

а) мету, призначення і чисельні значення основних тактико-технічних характеристик (TTX) створюваної геостаціонарної системи космічного зв'язку (ГСКЗ), космічним сегментом якої є геостаціонарний супутник зв'язку (ГСЗ):

$$\Gamma TX = \{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \dots, \tau_{1M}\} = \{\tau_{1m}\}, \ m = 1, M;$$

б) групу виробів-аналогів (за функціональним призначенням) з відомими ТТХ

$$\{\tau_{nm}\}, n=\overline{2,N}$$
,

де { $\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, ..., \tau_{1M}$ } — множина основних TTX створюваної ГСКЗ, { τ_{nm} } — множина основних TTX *n*-го виробу функціонального аналога, N — загальна кількість порівнюваних за технічним рівнем ГСКЗ, M — загальне число основних TTX.

Потрібно:

а) розробити методичний підхід до кількісної оцінки ТР ГСКЗ, що дозволяє суттєво знизити вплив суб'єктивного фактора на значення показника ТР. Побудувати укрупнений обчислювальний алгоритм;

б) побудувати детальний обчислювальний алгоритм розрахунків показника ТР ГСКЗ, розробити для цього алгоритму відповідне програмне забезпечення, виконати комп'ютерні розрахунки для заданих угруповань початкових даних.

Результати розрахунків повинні містити:

 – числове значення показника технічного рівня;

висновок про технічний рівень створюваної
 РКТ у лінгвістичних термінах: вищий від світового; рівний світовому; вищий від середньосві-

тового; рівний середньосвітовому; нижчий від середньосвітового; нижчий від світового рівня.

Опис розв'язку цього завдання доволі об'ємний, тому може стати предметом окремої статті.

Особливості ГСКЗ, які повинні бути враховані при розробленні методичного підходу:

а) показник ТР ГСКЗ повністю визначається основними технічними характеристиками супутника зв'язку, що перебуває в орбітальному польоті, тому що всі науково-технічні проблеми створення ГСКЗ зосереджено насамперед у ГСЗ, який повинен надійно функціонувати протягом не менш як 15 років в умовах космічного простору. Наземний сегмент ГСКЗ є комплексом радіотехнічних і програмно-технічних засобів, які функціонують у земних умовах, постійно технічно обслуговуються й ремонтуються, є стандартними або такими, що незначно модифікуються. Капітальні витрати на створення і виведення на орбіту ГСЗ становлять більш ніж 95 % від загальних витрат на створення ГСКЗ;

б) тотожні по функціональному призначенню ГСЗ-аналоги створюваного супутника зв'язку можуть суттєво відрізнятися за абсолютною інформативності (Мбіт/с), масою, кількістю встановлених на борту супутника транспондерів (апаратура зв'язку) і способом виведення ГСЗ на геостаціонарну орбіту (пряме виведення або через проміжну опорну орбіту).

3. МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Показник ТР виробів соціально-економічного призначення еквівалентний показнику якості цих виробів, тоді як показник ТР спеціальних виробів подвійного застосування тотожний показнику відносної технічної ефективності; для виробів військового призначення показник ТР з точністю до деякої константи дорівнює ймовірності виконання бойового завдання.

Супутник зв'язку відноситься до класу спеціальних технічних систем подвійного призначення, тому його часткові показники технічного рівня збігаються із частковими показниками технічної ефективності, і замість терміна «окремі показники ТР» будемо використовувати більш звичний розробникам РКТ термін «часткові показники технічної ефективності». Супутник зв'язку, що перебуває на орбіті (виробник послуг), виконує функцію передачі інформації від одного об'єкта, розташованого на поверхні Землі, до іншого. Тому склад його часткових показників технічної ефективності складається із двох груп:

– показники, що визначають якість послуг зв'язку (q_{α});

— показники, що характеризують досконалість конструкції самого супутника (q_{β}).

Такий поділ показників дозволяє суттєво спростити математичну модель розрахунків показників ТР.

Завдання кількісного оцінювання показника ТР ГСЗ ($K_{\rm TP}$) належить до класу багатокритеріальних завдань, які, як правило, розв'язуються методом адитивної згортки часткових критеріїв (часткових показників технічної ефективності). На користь даного методу кількісної оцінки ТР ГСЗ свідчать такі факти:

— показник технічного рівня $K_{\rm TP}$ є відносною безмірною величиною;

— часткові показники технічної ефективності q_{α} і q_{β} є незалежними.

Виходячи з наведених положень, математична модель для розрахунків показника ТР має такий вигляд:

$$K_{\rm TP} = \sum_{i} \beta_{i} \cdot \left(\frac{q_{\beta i}}{q_{\beta i}}\right)^{\gamma_{i}},$$

$$\sum_{i} \beta_{i} = 1, \ i = \overline{1, I_{\beta}},$$

$$K_{\rm H3} = \sum_{i} \alpha_{i} \cdot \left(\frac{q_{\alpha i}}{q_{\alpha i}}\right)^{\delta_{i}},$$

$$\sum_{i} \alpha_{i} = 1, \ i = \overline{1, I_{\alpha}},$$

$$q_{-}$$

$$(1)$$

 $q_{\alpha i}^{*} = \max\{q_{\alpha in}\},$ якщо $\frac{q_{\alpha_i}}{q_{\alpha_i}} \le 1$, при цьому $\delta_i = 1$, або

$$\begin{split} q^*_{\alpha i} &= \min\{q_{\alpha in}\}, \, \text{якщо} \, \frac{q_{\alpha_i}}{q_{\alpha_i}} > 1 \,, \, \text{при цьому} \, \, \delta_i = -1 \,, \\ q^*_{\beta i} &= \max\{q_{\beta in}\} \,, \, \text{якщо} \, \frac{q_{\beta_i}}{q_{\beta_i}} \le 1 \,, \, \text{при цьому} \, \delta_i = 1 \,, \\ q^*_{\beta i} &= \min\{q_{\beta in}\} \,, \, \text{якщо} \, \frac{q_{\beta_i}}{q_{\beta_i}} > 1 \,, \, \text{при цьому} \, \, \delta_i = -1 \,, \end{split}$$

де K_{g3} — показник якості послуг зв'язку, $q_{\alpha in}$ частковий *i*-й показник технічної ефективності *n*-го ГСЗ, що визначає якість послуг зв'язку, $q_{\alpha i}^{*}$ — частковий *i*-й показник технічної ефективності еталонного виробу ГСЗ, що визначає якість послуг зв'язки, q_{Bin} — частковий i -й показник технічної ефективності n -го ГСЗ, що визначає досконалість його конструкції, $q^*_{\beta i}$ — частковий *i*-й показник технічної ефективності еталонного виробу ГСЗ, що визначає досконалість його конструкції, α_i — нормований показник ступеня впливу *i*-го показника якості послуг зв'язку на величину корисного ефекту, β_i — нормований показник ступеня впливу *i*-го показника досконалості конструкції на величину корисного ефекту.

У такий спосіб складне завдання (1) зведено до розв'язку двох простіших завдань:

— визначення складу та значень параметрів $q_{\alpha i}$ і $q_{\beta i}$;

- визначення значень показників впливу α_i та β_i .

4. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Склад у системі рівнянь (1) початкових параметрів $\{q_{\alpha i}\}$ і $\{q_{\beta i}\}$ повинен визначатися системним аналізом (а не експертами із числа розроблювачів КА), виходячи із призначення й мети створення ГСЗ, а також з урахуванням результатів аналізу, наявних фактичних техніко-економічних показників виробів-аналогів.

В рівнянні (1) початкові параметри $q_{\alpha i}$ й $q_{\beta i}$ повинні задовольняти наступні основні вимоги:

 – бути функціональними характеристиками КА, які впливають на результати його застосування за призначенням;

- бути взаємонезалежними;

— ураховувати відмінність КА й КА-аналогів за масою, числом транспондерів і способом виведення супутника на геостаціонарну орбіту.

Кінцевим результатом роботи з визначення складу параметрів $\{q_{\alpha i}\}$ і $\{q_{\beta i}\}$ повинен бути формальний опис очікуваного корисного ефекту від застосування КА за призначенням і логічна схема кількісної оцінки ТР ГСЗ, які повинні супроводжуватися техніко-економічною інформацією від виробів-аналогів.

Структура корисного ефекту від використання ГСЗ за призначенням має вигляд

$$KE(\Gamma C3) = E_{K} + E_{HEO} + E_{T}$$

де $E_{\rm K}$ — комерційний економічний ефект, $E_{\rm H {\rm FO}}$ — економічні вигоди (відвернені збитки) за рахунок використання космічних технологій у сфері національної безпеки й оборони, $E_{\rm T}$ економічний ефект за рахунок трансферту створених технологій у галузі промисловості.

Логічна схема розв'язку завдання є початковими даними для експертів при формуванні матриці парних порівнянь (опис матриць наведено у п. 5). Приклад побудови логічної схеми кількісної оцінки ТР ГСЗ наведено на рисунку.

5. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ СТУПЕНЯ ВПЛИВУ ЧАСТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НА ВЕЛИЧИНУ КОРИСНОГО ЕФЕКТУ

Коректне (точне або близьке до точного) визначення показників ступеня впливу $\{\alpha_i\}$ і $\{\beta_i\}$ дотепер є проблематичним.

Математичні завдання виду (1) досить часто зустрічаються у сучасній теорії прийняття рішень. Серед багатьох методів розв'язування такого завдання найбільш математично обгрунтованим і найбільш часто використовуваним є метод аналізу ієрархій (MAI) Т. Сааті, у складі якого є метод парних порівнянь. Тому в основу пропонованого методичного підходу до розв'язку завдання кількісної оцінки ТР ГСЗ покладено метод парних порівнянь. Стосовно розглянутого завдання метод Т. Сааті модифіковано з метою максимально можливого врахування особливостей супутника зв'язку і забезпечення істотного зниження суб'єктивного фактора (експертів) на числове значення показника ТР ГСЗ.

5.1. *Суть методу Т. Сааті* [6] полягає у попарному порівнянні факторів, що впливають на значення загального для них критерію вищого рівня ієрархії з використанням спеціальної фундаментальної шкали відносного впливу часткових критеріїв (факторів) на значення критерію більш високого рівня. Психологічно для



Формальний опис корисного ефекту й логічна схема кількісної оцінки ТР ГСЗ: $q_{\rm KH}$ — питома вага корисного навантаження (апаратури зв'язку) у загальній масі ГСЗ, $q_{\rm E3}$ — питома енергозабезпеченість апаратури зв'язку (транспондерів), $T_{\rm CAI}^{\rm np}$ — наведений строк активного функціонування ГСЗ на орбіті, $q_{\rm IH}$ — питома інформативність ГСЗ, δ_0 — точність орієнтації (визначення кутового положення ГСЗ на орбіті), $\delta_{\rm C}$ — точність кутової стабілізації ГСЗ на орбіті, $K_{\rm яз}$ — показник якості зв'язку, D — добротність антенних систем, установлених на борту ГСЗ, G — коефіцієнт посилення антенної системи ГСЗ, K — шумова температура у приймальному тракті антенної системи ГСЗ, EIII еквівалентна ізотропно випромінювана потужність антенної системи ГСЗ, тужність антенної системи ГСЗ, $P_{\rm BI}$ — ймовірність помилки на 1 біт інформації ГСЗ

експерта це значно легше, ніж оцінювати вплив усіх відразу часткових факторів. Властивість порівнювати предмети попарно притаманна людському мозку незалежно від кількості предметів, що потрапили в його поле зору. Таким чином, результати парних порівнянь більш близькі за точністю до реальних значень.

Результати парних порівнянь надаються матрицею $A(a_{ij})$, де a_{ij} є відношенням ступеня w_i впливу *i*-го фактора на значення w_j критерію більш високого рівня до відповідного впливу *j*-го фактора, тобто

$$a_{ji} = w_i / w_j$$
 i $a_{ji} = 1 / a_{ij}$

Опис функціональної шкали Т. Сааті наведено у таблиці. Згідно з методом Т. Сааті оцінкою коректності дій експертів при формуванні матриці $A(a_{ij})$ є так званий індекс погодженості. Перевищення індексу погодженості допустимого значення вказує на наявність у матриці $A(a_{ij})$ помилок (кардинальних, логічних). У цих випадках експерт (група експертів) повинні повторно скласти матрицю парних порівнянь. Формула індексу погодженості виявляє наявність помилок у матриці $A(a_{ij})$, але не дозволяє встановити, які елементи матриці є помилковими. З метою усунення цього недоліку метод Т. Сааті модерні-

A			•		^ ·
Фунламентальна	шка па	вілносної	вяжливості	ТĽ.	Саяті
тупданствитьна	minute	видносног	Danamboen		Cuult

Відносна важливість <i>а_{іј}</i>	Рівень відносної переваги фактора q _і над фактором q _ј	Пояснення
1	Однакова важливість	Обидва фактори вносять однаковий вклад у показник ефек- тивності (ПЕ)
2	Слабка перевага	Незначна перевага впливу <i>i</i> -го фактора на показник ПЕ порів- няно з <i>j</i> -м фактором
3	Проміжний рівень між слабкою й середньою перевагою	Проміжне значення між слабким впливом і середньою перевагою
4	Середня перевага	Середня перевага впливу на показник ПЕ <i>i</i> -го фактора над <i>j</i> -м
5	Проміжний рівень між серед- ньою й сильною перевагою	
6	Сильна перевага	Сильна перевага впливу на показник ПЕ <i>i</i> -го фактора над <i>j</i> -м
7	Проміжний рівень переваги між сильним і дуже сильним	
8	Дуже сильна перевага	Дуже сильна перевага впливу на показник ПЕ <i>i</i> -го фактора
9	Абсолютна перевага	Немає ніяких сумнівів, що вплив на показник ПЕ <i>i</i> -го фактора дуже сильний порівняно із <i>j</i> -м

i

i

зовано шляхом включення в нього додаткових функцій.

5.2. Спосіб побудови матриці парних порівнянь. Первісний варіант матриці $A^0(a_{ij}^0)$ для парних порівнянь виконує експерт або група експертів під контролем провідного експерта (модератора), використовуючи підготовлену системним аналітиком техніко-економічну інформацію із супутників зв'язку (згідно з п. 4) і функціональну шкалу Т. Сааті.

Якщо первісна матриця $A^0(a_{ij}^0)$ не містить кардинальних або логічних помилок, то робота експертів на цьому завершується.

Якщо ж у результаті автоматичного контролю в матриці $A^0(a_{ij}^0)$ виявлено помилки, то експерти повинні їх усунути. Подальша участь експертів у визначенні показника ТР непотрібна.

5.3. Метод пошуку можливих грубих помилок у матриці парних порівнянь. На основі сформованої експертами первісної матриці $A^0(a_{ij}^0)$ автоматично (комп'ютерною програмою) будуються дві матриці: $B^0(b_{ij}^0)$ і $B(b_{ij})$. Матриця $B^0(b_{ij}^0)$ формується за правилом $b_{ij}^0 = 1$, якщо $a_{ij}^0 \ge 1$, інакше $b_{ij}^0 = 0$. Матрицям $A^0(a_{ij}^0)$ і $B^0(b_{ij}^0)$ відповідає кортеж номерів рядків $i^0 = \langle 1, 2, ..., I \rangle$ і кортеж наборів стовпців $j^0 = \langle 1, 2, ..., I \rangle$.

На підставі матриці $B^0(b_{ij}^0)$ формується бінарна матриця $B(b_{ij})$ шляхом упорядкування рядків цієї матриці по спаданню суми елементів рядків матриці $A^0(a_{ij}^0)$ і стовпців по зростанню сум елементів стовпців матриці $A^0(a_{ij}^0)$.

Кортеж рядків матриці $B(b_{ij})$ після цієї операції буде мати вигляд $i = \langle i_1, i_2, ..., i_I \rangle$, а кортеж стовпців $-j = \langle j_1, j_2, ..., j_I \rangle$. Елементи матриці $A^0(a_{ij}^0)$ не містять грубих помилок, якщо виконується умова

$$b_{ij} = 1$$
для всіх $j \ge i$
 $b_{ii} = 0$ для всіх $j < i$.

Елементи матриці $A^0(a_{ij}^0)$ будуть містити грубі помилки, якщо умова (2) не виконується.

5.4. Метод пошуку можливих логічних помилок у матриці парних порівнянь. Рядки й стовпці матриці $A^0(a_{ij}^0)$ необхідно впорядкувати у відповідності з рядками й стовпцями бінарної матриці $B(b_{ij})$. В результаті одержимо матрицю $A(a_{ij})$ $i = \langle i_1, i_2, ..., i_I \rangle$, $j = \langle j_1, j_2, ..., j_I \rangle$. Наявність можливих логічних помилок у матри-

Наявність можливих логічних помилок у матриці $A(a_{ij})$ визначається з умови дотримання транзитивності в рядках і стовпцях матриці $A(a_{ii})$:

$$a_{ij} \le a_{i(j+1)}$$
для $i \le j$,
 $a_{ij} \ge a_{(i+1)j}$ для $(i+1) > j$. (3)

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

(2)

Елементи матриці $A(a_{ij})$, для яких умова (3) не виконується, є помилковими. За індексами помилкових елементів a_{ij} визначаються помилкові елементи у матриці $A^0(a_{ij}^0)$.

5.5. Обчислення індексу погодженості елементів матриці парних порівнянь. Після усунення виявлених помилок у матриці попарних порівнянь $A^{0}(a_{ij}^{0})$ визначаються власні числа $\lambda = \{\lambda_{1}, \lambda_{2}, ..., \lambda_{I}\}$ цієї матриці.

Індекс погодженості визначається за формулою (4) [6]

$$I_C(\lambda) = \frac{\lambda_{\max} - I}{I - 1}, \qquad (4)$$

де λ_{\max} — максимальне власне число з безлічі $\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_I\}$.

Якщо параметр $I_C(\lambda)$ менший від наперед заданого рівня погодженості матриці парних порівнянь I_3 :

$$I_C \le I_3 \,, \tag{5}$$

то обчислюється власний вектор матриці $A^0(a_{ij}^0)$ для $\lambda = \lambda_{max}$.

5.6. Визначення ступеня впливу часткових показників ефективності на величину корисного ефекту. У випадку виконання умови (5) нормовані складові власного вектора матриці парних порівнянь, знайдені для власного числа λ_{max} , будуть [6] шуканими показниками значимості $\{\alpha_i\}$ й $\{\beta_i\}$, які необхідно використовувати для обчислення показника TP за формулою (1).

5.7. Обчислення компонентів власного вектора матриці парних порівнянь у випадку невиконання умови (5). При невиконанні умови (5) уточнюється вихідна матриця $A^0(a_{ij}^0)$ з умови, що помилки, пов'язані із цілочисельністю значень у фундаментальній шкалі відносної важливості, пропорційні сумі елементів рядків матриці $A^0(a_{ij}^0)$. На основі матриці $A^0(a_{ij}^0)$ будується уточнена матриця $A^*(a_{ii}^*)$ у такий спосіб:

$$a_{ij}^{*} = c_{im} \cdot c_{mj} ,$$

$$c_{mj} = \sum_{q=1}^{I} a_{mq}^{0} \cdot a_{qj}^{0} \cdot P_{q} , c_{jm} = \frac{1}{c_{mj}}$$

$$P_{q} = \frac{\sum_{s=1}^{I} a_{qs}^{0}}{\sum_{s=1}^{I} \sum_{q=1}^{I} a_{qs}^{0}} ,$$

де число *m* дорівнює номеру рядка k матриці $A^0(a_{ij}^0)$, для якого параметр P_q приймає найбільше значення.

Для матриці $A^* = [a_{ij}^*]$ обчислюються максимальне власне число λ_{\max}^* та відповідні компоненти власного вектора $\alpha^{-*} = \{\alpha_1^*, \alpha_2^*, ..., \alpha_I^*\}$.

Отримані значення координат власного вектора α^* повинні використовуватися для обчислення показника ТР.

5.8. Укрупнений обчислювальний алгоритм кількісної оцінки ТР ГСЗ. Крок 1. Виконати опис вербальної постановки завдання (відповідно до п. 4), дані якого є початковими для експерта (експертів) при побудові двох матриць парних порівнянь $A^0_{\alpha}(a^0_{ij})$ і $A^0_{\beta}(a^0_{ij})$. Матриця $A^0_{\alpha}(a^0_{ij})$ будується для часткових показників якості послуг зв'язку q_{α} (третій рівень ієрархії на рисунку). Матриця $A^0_{\beta}(a^0_{ij})$ будується для часткових показників технічної досконалості конструкції ГСЗ q_{β} (другий рівень ієрархії на рисунку).

Крок 2. За даними, підготовленими на кроці 1 (відповідно до п. 5.2), сформувати первісну матрицю парних порівнянь $A^0_{\alpha}(a^0_{ii})$.

Крок 3. Автоматична перевірка наявності грубих помилок у первісній матриці парних порівнянь (відповідно до п. 5.3).

При наявності помилок сформувати пари значень індексів рядків і стовпців у матриці $A^0(a_{ij}^0)$, що має помилки, та перейти до кроку 2.

Інакше перейти до кроку 4.

Крок 4. Автоматична перевірка наявності логічних помилок у матриці $A^0(a_{ij}^0)$ відповідно до п. 5.4. При наявності логічних помилок перейти до кроку 2. Інакше перейти до кроку 5.

Крок 5. Обчислити індекс погодженості відкоректованої на кроках 2, 3 і 4 матриці парних порівнянь відповідно до п. 5.5.

У випадку, якщо індекс погодженості перевищує допустиме значення, перейти до кроку 6. Інакше перейти до кроку 7.

Крок 6. Уточнити минулу перевірку на наявність помилок матрицю парних порівнянь для усунення впливу на індекс погодженості відповідно до п. 5.7. Обчислити індекс погодженості для відкоректованої матриці $A^*(a_{ij}^*)$. Якщо індекс погодженості перевищує допустиме зна-

чення, то повторити крок 6 для первісної матриці $A^*(a_{ii}^*)$. Інакше перейти до кроку 7.

Крок 7. Обчислити значення показників впливу $\{\alpha_i\}$ відповідно до п. 5.6. Обчислити значення показника якості послуг зв'язку К_{СВ}. Перейти до кроку 8.

Крок 8. Повторити кроки 2-6 для визначення показників значимості {β,}:

— побудувати первісну матрицю $A^0_\beta(a^0_{ij})$; — усунути виявлені помилки в матриці $A^0_\beta(a^0_{ij})$;

- побудувати (при необхідності) уточнену матрицю $A^*_{\beta}(a^*_{ij})$ і повторити крок 6 для цієї матриці.

Перейти до кроку 9.

Крок 9. Обчислити значення ступеня впливу $\{\beta_i\}$ відповідно до п. 5.6. Обчислити значення показника технічного рівня за формулами (1). Перейти до кроку 10.

Крок 10. Визначити технічну досконалість створюваного ГСЗ стосовно множини порівнюваних функціонально однорідних виробів-аналогів. Сформувати висновок про технічну досконалість створюваного ГСЗ, вибравши одне значення з множини лінгвістичних значень: <вищий від світового; рівний світовому; вищий від середньосвітового; рівний середньосвітовому; нижчий від середньосвітового; нижчий від світового рівня >.

ВИСНОВОК

1. Наведений методичний підхід до кількісної оцінки технічного рівня (технічної досконалості) геостаціонарного супутника зв'язку дозволяє суттево знизити вплив суб'єктивного фактора на чисельне значення показника ТР. Це досягається за рахунок високого рівня формалізації процесу кількісної оцінки технічного рівня. Роль експертів зведено до мінімуму — до рівня підготовки допоміжних вихідних даних.

2. В основу пропонованого методичного підходу покладений досить математично обґрунтований і широко використовуваний у сучасній теорії прийняття рішень метод аналізу ієрархій Т. Сааті.

Метод Т. Сааті доповнений деякими математичними процедурами, які дозволяють:

 врахувати особливості геостаціонарного супутника зв'язку;

- автоматично контролювати судження експертів на предмет наявності помилок і логічних протиріч.

3. На основі запропонованого підходу може будуватися методика кількісної оцінки технічного рівня геостаціонарного супутника зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Галькевич И. А. Разработка инструментария определения технико-экономических параметров космических телекоммуникационных проектов: дис. ... канд. экономич. наук. Москва, 2015. 283 с. URL: http://search.rsl.ru/ru/record/01007987089 (дата звертання: 07.06.2019).
- 2. Галькевич И. А. Методический подход к оценке конкурентоспособности ракетно-космической техники коммерческого назначения. Тр. МАИ. 2018. Вып. 73. URL: http://www.mai.ru/science/trudy (дата звертання: 08.02.2019).
- 3. Крянев А. В., Семенов С. С. Метод оценки технического уровня сложных технических систем, основанных на использовании зарождающихся технологий. Управление большими системами. 2012. Вып. 39. С. 5—36.
- 4. Кулешов А. В., Прокопчик Н. Г., Богомолов А. А., Абросимов Н. А. Методический подход к оценке технического уровня универсальных стартовых комплексов ракет космического назначения с использованием обобщенного показателя. Вестн. Самар. гос. аэрокосмич. ун-та. 2010. № 2. С. 198-203.
- 5. Ногин В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев. Вычисл. мат. и мат. физ. 2004. 44, № 7. С. 1259 — 1268.
- 6. Саати Т. Принятие решений метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
- 7. Самохвалов Ю. Я., Бурба О. И. Оценка эффективности научных и научно-технических проектов на основе обобщенной функции Харрингтона. Системи управління, навігації та зв'язку. 2018. Вип. 4. С. 77—85. URL: http://nbuv. gov.ua/ UJRN/suntz_2018_4_17 (дата звертання: 20.05.2019).

Стаття надійшла до редакції 09.09.2019

REFERENCES

- 1. Galkevich I. A. (2015). *Development of a toolkit for determining the techno-economic parameters of space telecommunication projects*: dissertation for the degree of candidate of economic sciences. Moscow, 283 p. URL: http://search.rsl.ru/ru/re-cord/01007987089 (Last accessed: 07.06.2019).
- Galkevich I. A. (2018). Methodical approach to assessing the competitiveness of rocket-space technology for commercial use. *Trudy MAI*, No. 73. URL: http://trudymai.ru/upload/iblock/804/80409c6f075dd52366707575651f1c1d.pdf (Last accessed: 07.06.2019).
- 3. Kryanev A. V., Semenov S. S. (2012). Development of modern technology and method to estimate technological level of complex technical systems based on arising technologies. *Large-Scale Systems Control*, No. 39, 5–36.
- Kuleshov A. V., Prokopchik N. G., Bogomolov A. A., Abrosimov N. A. (2010). Technical approach for estimation of engineering level of universal launch complexes for space launch vehicles with use of overal parameter. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, No. 2, 198–203.
- 5. Noghin V. D. (2004). A simplified variant of the analytic hierarchy process based on a nonlinear scalarizing function. *Computational mathematics and mathematical physics*, **44**, No. 7, 1194–1202.
- 6. Saaty T. (1993). Making decisions analytic hierarchy process. Moscow: Radio and communication.
- Samokhvalov Yu., Burba O. (2018). Assessment of the efficiency of scientific and scientific and technical projects based on the Harrington generalized function. *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 4, 77–85. URL: http://nbuv.gov. ua/UJRN/suntz_2018_4_17 (Last accessed: 07.06.2019).

Received 09.09.2019

*E. A. Petlyak*¹ Head of Division E-mail: petlyak@ukr.net *V. T. Marchenko*² Researcher E-mail: office.itm@nas.gov.ua

¹ Yuzhnoye State Design Office

- 3 Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine
- ² Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine
- and the State Space Agency of Ukraine
- 15 Leshko-Popelia Str., Dnipro, 49005 Ukraine

ABOUT ONE OF THE APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL LEVEL OF GEOSTATIONARY COMMUNICATION SATELLITES

The purpose of the study is to develop a methodological approach to the problem of a quantitative assessment of the technical level (technical excellence) of geostationary telecommunication satellites (GTS). The technical level indicator is a quantitative measure for assessing the perfection of the design of a product and the quality of products (services) produced with its use. This is an important technical and economic indicator of experimental design work. The value of the technical level indicator is one of the determining factors in the competitiveness of the created space system. The paper discusses the existing methodological approaches to the quantitative assessment of the technical level of science-intensive and technically complex products.

We present a new approach to determine the composition of technical performance markers for calculating the GTS technical level indicator allowing a formal description of the beneficial effect and a logical scheme for quantifying the technical level. The methodological approach to calculate the degree of influence of technical efficiency indicators on the value of the beneficial effect of the use of GTS is stated as well. It is based on a mathematical model of the hierarchy analysis introduced by T. Saaty, complemented by us with mathematical models for the best consideration of GTS technical features. It allowed us to ensure control of errors and contradictions in expert judgments involved in the preparation of initial data of unmeasurable or hardly measurable techno-economic indicators of GTS. Due to the higher level of formalization of the process of quantifying the technical level and the application of mathematical methods used in modern decision theory, the developed methodological approach serves to improve the quality of calculations significantly and to reduce the influence of the subjective factor in determining the value of the technical level indicator. Based on the above, we developed a method for quantitative assessment of the GTS technical level that meets the modern requirements.

Keywords: geostationary telecommunication satellite, quantitative assessment of the technical level, spacecraft, analytic hierarchy process, space technology.

Космічні матеріали та технології

Space Materials and Technologies

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.015 УДК 620.196.9

Т. А. МАНЬКО¹, проф. кафедри технології виробництва, д-р техн. наук

E-mail: tamaramanko1607@gmail.com

I. О. ГУСАРОВА², нач. відділу фізичних методів контроля матеріалів і конструкцій

О. М. ПОТАПОВ², нач. комплекса нових матеріалів і перспективних технологій, канд. техн. наук,

акад. Міжнарод. Акад. астронавтики, акад. Акад. технол. наук, лауреат Державної премії в галузі науки і техніки **Є. В. СОЛОДКИЙ**³, старш. наук. співроб. кафедри високотемпературних матеріалів та порошкової металургії, канд. техн. наук

¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Проспект Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49010

² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля

вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

ВПЛИВ НАНОМОДИФІКАТОРІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕКОМПОЗИТІВ

Властивості вуглекомпозитів залежать від взаємодії на межі фаз «наповнювач — матриця». Одним із найбільш ефективних способів підвищення міжфазової адгезії є введення модифікувальних нанодомішок до складу матриці. За рахунок армування матриці можна підвищити механічні властивості вуглекомпозиту. Проведено аналіз різних наномодифікаторів сімейства нановуглеців, що містить фулерени, нанотрубки, графени, наноалмази. Унікальні характеристики у поєднанні з помірною собівартістю та комерційною доступністю вигідно відрізняють наноалмази від інших наночастинок. У роботі показано доцільність модифікування епоксидного сполучного HUNTSMAN наноалмазами, що мають малий та однорідний розмір, сферичну форму частинок, а також доступну зовнішню поверхню. Описано технологію введення наноалмазів у епоксидне сполучне та виготовлення на його основі вуглекомпозитів. Наноалмази вводилися в легколеткий розчинник тетрагідрофуран під впливом ультразвуку для забезпечення хорошого диспергувального середовища. Для визначення оптимального вмісту наномодифікаторів, що дозволяють підвищити міжфазну адгезію, досліджувалось багатокомпонентне епоксидне сполучне HUNTSMAN на основі смоли Araldite LY556, отверджувача Aradur 917 і прискорювача Accelerator DY 070 з вмістом наноалмазів 0.26; 0.52; 2.6; 5.2 і 10.4 мас. %. Встановлено, що введення наноалмазів у кількості 2.6 мас. % дозволяє збільшити твердість матеріалів до 50 %. Результати досліджень показали, що під час введення в епоксидне сполучне мінімальної кількості 0.26 мас. % наномодифікаторів спостерігається максимальне підвищення міцнісних характеристик наномодифікованих вуглекомпозитів до 18 %. Роботи виконано у рамках угоди про надання гранту програми «Горизонт 2020».

Ключові слова: вуглекомпозити, наноалмази, епоксидна смола, міцність, мікроструктура.

В аерокосмічній і авіаційній промисловості найбільш перспективними є вуглекомпозити, що мають цінний комплекс фізико-механічних, теплофізичних і електротехнічних властивостей при невеликій щільності. Однак при широкому використанні резерви підвищення міцнісних характеристик ще далеко не вичерпано. Для їхнього збільшення та забезпечення міжфазної адгезії застосовують різні технологічні методи, зокрема введення наномодифікаторів у сполучне [3, 5, 6].

Цитування: Манько Т. А., Гусарова І. О., Потапов О. М., Солодкий Є. В. Вплив наномодифікаторів на властивості вуглекомпозитів. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 15–21. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.015



Рис. 1. Результати аналізу порошку наноалмазів: на просвічувальному електронному мікроскопі: $a - \times 100000$, $\delta - \times 250000$, e - дифрактограма



Рис. 2. Мікроструктура отриманих полімерів з різним вмістом наноалмазів: *а*, *б*, *в* – 5, 10 і 20 мас. %

2	Вмі	ст НА, мас. %	HV		
эразок	в епоксидній смолі	у сполучному HUNTSMAN	експеримент	теорія	
1	0	0	16 ± 1.5	(за правилом сумішей)	
2	5	2.6	24 ± 3 (50 %)	18.1	
3	10	5.2	29 ± 3 (81 %)	20.6	
4	20	10.4	34 ± 4 (112 %)	25.6	

Таблиця 1. Значення твердості HV сполучного HUNTSMAN, модифікованого наноалмазами

Досліджено вплив нанодомішок на міцнісні властивості вуглекомпозитів на основі вуглецевого волокна та сполучного HUNTSMAN, що містить епоксидну смолу, отверджувач і прискорювач. Для підвищення якості сполучного було досліджено вуглецевовмісні наночастинки, такі як вуглецеві нанотрубки з діаметром 25 нм і завдовжки 20 мкм, графен з діаметром 15 мкм і завтовшки 8 нм і наноалмази діаметром 5 нм [1, 4, 7]. Встановлено, що подовжений нанонаповнювач, такий як нанотрубка, навіть при невеликій його кількості збільшує в'язкість полімерів, що становить серйозну проблему для виробництва [2]. Крім того, циліндричні та пластинчасті нанонаповнювачі мають більш сприятливу геометрію для міжчастинкової взаємодії Ван-дер-Ваальса, що призводить до їхнього сполучення.

Наноалмази найбільше впливають на властивості полімерів завдяки їхній сферичній формі та малому розміру частинок. Зважаючи на перевагу наноалмазів, доступну зовнішню поверхню для модифікування сполучного, було використано наноалмази з розмірами частинок не більше 10 нм.



Рис. 3. Технологія виготовлення вуглекомпозиту, модифікованого наноалмазами

Становить інтерес процес дослідження наноалмазів. Наноалмази вводили в легколеткий розчинник тетрагідрофуран під впливом ультразвуку, забезпечуючи хороше диспергувальне середовище. Відповідність частинок потрібним параметрам оцінювали за допомогою електронно-мікроскопічного аналізу. Підтверджено відповідність частинок заданому розміру 10 нм. Фазовий склад порошку наноалмазу визначали на дифрактометрі «Rigaku Ultima-IV» за допомогою СиКα-випромінювання (рис. 1).

Аналіз дифрактограм показав, що всі рефлекси відповідають технічному алмазу, інших фаз не ідентифіковано. Велика ширина піків відповідає нанодисперсності порошку.

Введення наноалмазних частинок у вуглекомпозити пов'язане з відносно великою в'язкістю епоксидної смоли, тому виникають труднощі такого введення. Для зменшення в'язкості використовують легколеткий розчинник тетрагідрофуран. На основі аналізу результатів вимірювання в'язкості системи «епоксидна смола — тетрагідрофуран» встановлено його вміст.

Розроблено технологію та режими змішування епоксидної смоли з розчинником, в якому вміст наноалмазів становив 5, 10 і 20 мас. %.

Запропоновано модифікацію багатокомпонентного сполучного HUNTSMAN на основі смоли Araldite LY556 з додаванням отверджувача Aradur 917 і прискорювача Accelerator DY 070.

В отверділих заготовках модифікованого сполучного HUNTSMAN кількість наноалмазів становила 2.6; 5.2 і 10.4 мас. %.

Дослідження мікроструктури модифікованих полімерів показало, що в основному обсязі цифрове зображення матриці має рівномірний сірий колір, що свідчить про однорідний розподіл наноалмазів в епоксидному сполучному. Спостерігаються лише незначні вкраплення частинок, причому їхній розмір дещо збільшується з підвищенням концентрації введених наноалмазів (рис. 2).

У результаті оцінювання залежності міцнісних характеристик сполучного встановлено, що введення наноалмазів у кількості 2.6 мас. % дозволяє збільшити твердість матеріалів до 50 % (табл. 1). Це може бути пов'язано зі збільшенням адгезії на площі контакту наночастинок з матрицею.

Розроблення технології виготовлення вуглекомпозиту, модифікованого наноалмазами, передбачає введення їх в епоксидну смолу, а потім цієї композиції — у сполучне HUNTSMAN. Далі відбувається просочення вуглеволокна, намотування препрега, отвердіння та контроль якості вуглекомпозиту (рис. 3).

Для визначення впливу модифікованого наноалмазами сполучного HUNTSMAN на ме-



Міцність вуглекомпозиту під час згину упоперек волокон, МПа
 Твердість сполучного Huntsman за Вікерсом, HV

Рис. 4. Залежність характеристик сполучного та вуглекомпозиту від вмісту наноалмазів

ханічні характеристики матеріалу, отриманого методом намотування, було досліджено модифіковані вуглекомпозити. Оцінено міцність під час згину та зсуву (табл. 2).

На основі аналізу отриманих результатів встановлено, що під час введення у сполучне наноалмазів у кількості 2.6 і 5.2 мас. % міцність під час згину вуглекомпозиту упоперек волокон збільшується до 12 %. При збільшенні кількості наноалмазів до 10.4 мас. % зміни міцності матеріалу не спостерігалося. Ці дані корелюють з результатами вимірювання твердості при концентрації наноалмазів у сполучному, що не перевищує 5.2 мас. %. Міцність матеріалу під час зсуву та згину уздовж волокон залишається однаковою як для вихідних, так і для модифікованих вуглекомпозитів, що може свідчити про обмежену змочуваність на межі фаз.

У роботі подано порівняльні характеристики сполучного та вуглекомпозиту, модифікованих наноалмазами (рис. 4).

Досліджено мікроструктуру зразків модифікованого вуглекомпозиту. Результати аналізу фрагментів матеріалу після руйнування показали більш рівномірний розподіл наночастинок при концентраціях наноалмазів до 5.2 мас. % (рис. 5).

Слід зазначити, що у зразках вуглекомпозиту, як контрольних, так і модифікованих наноалмазами, спостерігається невелика пористість, що викликає необхідність зменшити в'язкість сполучного (рис. 6). Для цього підвищили температуру сполучного до 50 °С під час намотування препрега та зменшили вміст наноалмазів у матриці до 0.26 і 0.52 мас. %.

Досліджено механічні характеристики вуглекомпозиту (табл. 3).

Результати досліджень показали, що внаслідок введення у смолу мінімальної кількості НА, що становить 0.5 мас. % (0.26 мас. % у сполуч-

Вміст НА	Вміст НА у сполуч- ному HUNTSMAN, мас. %	Міцність під час зсуву, МПа	Міцність під ч	ас згину, МПа	A - 07	A - 01	
смолі, мас. %			уздовж	уздовж упоперек ДОС _{3с} , 70 ДОС	ек $\Delta \sigma_{3c}, \%$ Δ		Δσ _{3г.уп} , %
0	0	57.25	750.82	48.05	_	_	_
5	2.6	57.31	775.45	53.69	0.09	3.28	11.74
10	5.2	56.05	743.10	53.82	-2.10	-1.03	12.01
20	10.4	56.59	756.19	47.97	-1.16	0.72	-0.17

Таблиця 2. Механічні характеристики вуглекомпозиту

Таблиця З. Механічні характеристики вуглекомпозиту

Вміст НА	Вміст НА	Міцність під	Міцність під ч	ас згину, МПа	. 07	. ~	
в епоксиднии смолі, мас. %	в сполучному HUNTSMAN, мас. %	час зсуву, МПа	уздовж	упоперек	$\Delta\sigma_{3c}, \%$	Δσ _{3Γ.y3} , %	Δσ _{3г.уп} , %
0	0	63.41	961.32	73.44	_	_	_
0.5	0.26	64.43	1005.81	86.67	2	4	18
1	0.52	63.83	982.43	77.12	1	2	4



Рис. 5. Мікроструктура фрагментів вуглекомпозиту з різним вмістом наноалмазів: a - 2.6 % НА у сполучному, $\delta - 5.2 \%$ НА у сполучному



Рис. 6. Мікроструктура поверхні зразків вуглекомпозиту у сполучному: a - 0 % HA, b - 2.6 % HA, e - 5.2 % HA

ному), спостерігається максимальне збільшення міцності під час згину упоперек волокон до 18 %. Міцність односпрямованого вуглекомпозиту уздовж волокон після зсуву та згину практично не змінилася під час введення у сполучне НА у всьому діапазоні досліджуваних концентрацій.

Мікроструктурні дослідження (рис. 7) вуглекомпозиту після введення 0.26 мас. % НА у сполучне підтверджують результати фізико-механічних характеристик. Структура має рівномірний сірий колір: пористості немає.

ВИСНОВКИ

Досліджено вплив наномодифікаторів (нанотрубки, графен, наноалмази) на міцнісні властивості вуглекомпозитів.



Рис. 7. Мікроструктура поверхні вуглекомпозиту з вмістом НА 0.26 мас. %

Показано доцільність модифікування сполучного наноалмазами, що мають малий та однорідний розмір, сферичну форму частинок, а також доступну зовнішню поверхню.

Розроблено методи введення наноалмазів у сполучне, що забезпечують їхній рівномірний розподіл. Для цього наноалмази диспергували у розчині тетрагідрофурану, а потім вводили у сполучне. Введення наноалмазів у сполучне у кіль-

кості 2.6 мас. % дозволило збільшити твердість сполучного до 50 %.

Показано, що підвищення міцності під час згину до 18 % вуглекомпозиту досягається при вмісті у сполучному наноалмазів до 0.26 мас. %.

Роботи виконано у рамках угоди № 685844 про надання гранту програми «Горизонт 2020» (H2020 NMP-22-2015).

ЛІТЕРАТУРА

- Alishahi E., Shadlou S., Doagou-R S., Ayatollahi M. R. Effects of carbon nanoreinforcements of different shapes on the mechanical properties of epoxy based nanocomposites. *Macromol. Mater. Eng.* 2013. 298 (6). P. 670–678.
- Allaoui A., Bounia N. E. Rheological and electrical transitions in carbon nanotube/epoxy suspensions. *Curr. Nanosci.* 2010. 6 (2). P. 153–162.
- Georgiou P., Walton J., Simitzis J. Surface modification of pyrolyzed carbon fibres by cyclic voltammetry and their characterization with XPS and dye adsorption. *Electrochimica Acta*. 2010. 55. P. 1207–1216.
- 4. Gogotsi Y., Presser V. Carbon Nanomaterials. 2nd ed. CRC Press, 2013. 514 p.
- Jones C. Effects of electrochemical and plasma treatments on carbon fibers surfaces. *Surface and Interface Analysis*. 1993. 20. P. 357–367.
- Shkolnik S., Hocker H., Electrocoating of carbon fibers with polymers. 2. Electrocopolymerization of Monofunctional Monomers. *Polymer*. 1992. 33(8). P. 1669–1675.
- 7. Winey K. I., Vaia R. A. Polymer nanocomposites. MRS Bull. 2007. 32 (4). P. 314-319.

Стаття надійшла до редакції 05.07.2019

REFERENCES

- 1. Alishahi E., Shadlou S., Doagou-R. S., Ayatollahi M. R. (2013). Effects of carbon nanoreinforcements of different shapes on the mechanical properties of epoxy based nanocomposites. *Macromol. Mater. Eng.*, **298** (6), 670–678.
- 2. Allaoui A., Bounia N. E. (2010). Rheological and electrical transitions in carbon nanotube/epoxy suspensions. *Curr. Nanosci.*, **6** (2), 153–162.
- 3. Georgiou P., Walton J., Simitzis J. (2010). Surface modification of pyrolyzed carbon fibres by cyclic voltammetry and their characterization with XPS and dye adsorption. *Electrochimica Acta*, **55**, 1207–1216.
- 4. Gogotsi Y., Presser V. (2013). Carbon Nanomaterials. CRC Press.
- 5. Jones C. (1993). Effects of electrochemical and plasma treatments on carbon fibers surfaces. *Surface and Interface Analysis*, **20**, 357–367.
- Shkolnik S., Hocker H. (1992). Electrocoating of carbon fibers with polymers. 2. Electrocopolymerization of monofunctional monomers. *Polymer*, 33(8), 1669–1675.
- 7. Winey K. I., Vaia R. A. (2007). Polymer nanocomposites. MRS Bull., 32 (4), 314-319.

Received 05.07.2019

- T. Manko¹, Dr. Sci., Prof. of the Department of Production Technology of the Faculty of Physics and Technology
- *I. Husarova*², Dr. in Tech. Sci., Head of the Department of Physical Methods of Materials and Structures Control E-mail: olgaromenskaja@gmail.com

*O. Potapov*², Dr. in Tech. Sci., Head of the Department of New Materials and Advanced Technologies, Acad. of the International Academy of Astronautics, Acad. of the Academy of Technical Sciences, Laureate of the State Awards in Science and Technology of Ukraine

Ye. Solodkii³, Dr. in Tech. Sci., Senior Researcher of the Department of High-Temperature Materials and Powder Metallurgy

¹Oles Honchar Dnipro National University

72 Gagarina Ave, Dnipro, 49010 Ukraine

3 Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

³ National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Peremohy Ave, 37, Kyiv, 03056 Ukraine

INFLUENCE OF NANOMODIFIERS ON THE PROPERTIES OF CARBON COMPOSITES

The properties of carbon composites depend on the interaction at the "filler-matrix" phase boundary. One of the most effective ways to increase interphase adhesion is the introduction of modifying nanoadditives into the matrix. By reinforcing the matrix, the mechanical properties of the carbon composite can be improved. We conducted the analysis of various nanomodifiers of the nanocarbon family, which includes fullerenes, nanotubes, graphenes, and nanodiamonds. Unique characteristics combined with moderate cost price and commercial availability distinguish well nanodiamonds from other nanoparticles. The paper demonstrates the feasibility of modifying the HUNTSMAN epoxy binder with nanodiamonds having a small and uniform size, a spherical particle shape, and an accessible outer surface. We present the technology of introducing nanodiamonds into an epoxy binder and manufacturing of carbon composites on its basis. Nanodiamonds were introduced into the light-flow solvent tetrahydrofuran under the influence of ultrasound providing a good dispersing medium. To determine the optimal content of nano-modifiers, allowing to increase interfacial adhesion, a multi-component epoxy binder HUNTSMAN based on Araldite LY556 resin, Aradur 917 hardener, and Accelerator DY 070 accelerator was investigated with nanodiamonds content of 0.26, 0.52, 2.6, 5.2, and 10.4 wt. %. We found that the introduction of nanodiamonds in an amount of 2.6 wt. % allows us to increase the hardness of materials up to 50 %. We show that introducing a minimum amount of nanomodifiers, containing up to 0.26 wt. %, into the epoxy binder gives a maximum increase in the strength characteristics of nanomodified carbon composites up to 18 %. The work was carried out under the Horizon-2020 grant agreement.

Keywords: carbon composite, nano-diamonds, epoxy resin, strength, microstructure.

² Yuzhnoye State Design Office

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.022 УДК 67.02

С. О. ОДАЙСЬКИЙ¹, інж. E-mail: tolya220@gmail.com О. М. ПОТАПОВ¹, нач. комплексу перспективних матеріалів і технологій, акад. Акад. технол. наук України, канд. техн. наук, акад. МАА С. В. ФЕДОРЕНКО², нач. групи А. П. ЩУДРО¹, пров. інж.-конструктор А. С. КУЛИК¹, інж.-конструктор

¹ ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля» вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49047

² Дніпропетровське представництво генерального замовника — Державного космічного агентства України вул. Криворізька 1, Дніпро, Україна, 49047

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

При проєктуванні літальних апаратів широко використовуються рамні силові конструкції, в яких для зменшення масогабаритних характеристик застосовуються композитні стрижньові елементи. Для вирішення проблем виготовлення стрижневих елементів з полімерних композиційних матеріалів було розроблено технологію виготовлення вуглепластикових труб з використанням наявного верстата для намотування вуглецевого волокна, що забезпечує необхідну міцність і жорсткість переважно у поздовжньому напрямку. При розрахунках стрижневих елементів слід врахувати всі навантаження, які будуть впливати на конструкцію з урахуванням коефіцієнта термічного розширення. Для досягнення необхідних фізико-механічних і теплофізичних характеристик оптимальною схемою армування з квазіпоздовжнім напрямком волокон.

Розроблено спосіб виготовлення з використанням технологічного прийому, що дозволяє отримати схему армування з орієнтацією волокон в квазіпоздовжньому напрямку з кутом армування близько 1° комбінованим методом пошарового намотування вуглецевого волокна та викладення пакетів припрегів на формоутворювальну оправку з подальшим термічним зшиванням полімерної матриці. В результаті технологічного відпрацювання були отримані зразки вуглепластикових стрижневих елементів, на яких провадилося тестування розрахункових характеристик. З метою перевірки фізико-механічних і теплофізичних характеристик визначались межі міцності і модулі пружності при згинанні, при крученні і при стисненні, визначався також коефіцієнт температурного розширення. Отримані характеристики залежностей модуля пружсності матеріалу дослідних зразків труби від кута орієнтації волокон корелюють з теоретичними розрахунками.

На представлений спосіб отримано патент України № UA 128613.

Ключові слова: стрижневий елемент, труба, вуглепластик, намотування вуглецевого волокна, схема армування.

ВСТУП

Одним з основних несучих елементів авіакосмічної техніки є фермові і рамні конструкції, які працюють в умовах силових і температурних навантажень, що змінюються в широкому діапазоні. Високі вимоги до подібних конструкцій (висока і стабільна міцність і жорсткість, мінімальна вага, низький і стабільний коефіцієнт термічного розширення) можуть бути задоволені при використанні елементів, виготовлених

Цитування: Одайский С. А., Потапов А. М., Федоренко С. В., Щудро А. П., Кулик А. С. Спосіб виготовлення труб з полімерних композиційних матеріалів для конструкцій літальних апаратів. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 22–27. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.022

з вуглепластиків у вигляді труби прямокутного перетину з фітингами.

Сучасні адитивні технології виробництва виробів з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) дозволяють автоматизувати виконання виробничих операцій і істотно розширити перелік вузлів, виготовлених з ПКМ, в аерокосмічній техніці. Серед адитивних технологій, що знайшли застосування при серійному виробництві деталей з ПКМ, найбільшого поширення набули: автоматизоване розміщення волокна (для виготовлення корпусних деталей зі складною геометричною формою), мокре намотування вуглецевого волокна (для виготовлення деталей у вигляді тіл обертання). Через те що стрижневі елементи найчастіше є прямолінійними трубами квадратного або прямокутного перерізу, більш технологічною для даного типу виробу є технологія мокрого намотування.

Відомі способи виготовлення вуглепластикових стрижневих елементів рамних і фермових силових конструкцій з ПКМ. У роботі [4] описано спосіб, в якому на формоутворювальне оправлення намотуються шари волокна, просоченого полімерним сполучним. Відомий також спосіб [5], в якому на формоутворювальне оправлення намотують спіральні шари просоченої тканини наповнювача з переважною кількістю «уточних» армувальних волокон.

Викладені вище способи мають ряд недоліків, серед яких найголовнішим є неможливість створення ПКМ-труб з високою міцністю і жорсткістю переважно у поздовжньому напрямку.

Метою роботи є пошук оптимальної схеми армування, яка б забезпечувала необхідні пружноміцнісні параметри силових конструкцій літальних апаратів, створення оптимальної технології для виготовлення труб прямокутного перерізу для силових конструкцій літальних апаратів, визначення фізико-механічних і теплофізичних характеристик виробів, і проведення порівняльного аналізу отриманих результатів.

ВИБІР СХЕМ АРМУВАННЯ

Відомо, що для виробів з вуглекомпозиту зміна кута армування істотно впливає на пружні константи матеріалу.



Рис. 1. Залежність константи E_x від кута армування: 1 -структура [+ ϕ], 2 -структура [± ϕ], 3 -структура [0°, + ϕ], $\psi_0 = 0.5$



Рис. 2. Залежність константи G_{xy} від кута армування: 1 -структура [+ ϕ], 2 -структура [$\pm \phi$], 3 -структура [$0^{\circ}, +\phi$], $\psi_0 = 0.5$

З графіків залежності констант пружності E_x , G_{xy} (рис. 1, 2) і графіка залежності коефіцієнта термічного розширення (КТР) від кутів армування (рис. 3) видно, що найкращі характеристики вуглепластику можна отримати для схеми армування з симетричним розташуванням армувальних джгутів відносно поздовжньої осі вироби зі структурою [± φ] [2].



Рис. 3. Графік залежності коефіцієнта термічного розширення від кутів армування: 1 -структура [+ ϕ], 2 -структура [± ϕ], 3 -структура [0°, + ϕ], $\psi_0 = 0.5$



Рис. 4. Узагальнений графік залежностей пружно-міцнісних теплофізичних характеристик від кута армування волокна

Для аналізу залежностей властивостей вуглепластикових труб від кута армування з графіків залежності E_x , G_{xy} , a_x від кута армування сформований узагальнений графік, зображений на рис. 4. На графіку можна виділити три області залежності властивостей матеріалу від кута армування.

Область з кутами армування понад 50° використовувати нераціонально, через те що поздовжня жорсткість має малі значення, КТР помітно збільшується і стає залежним від похибок виготовлення. Область від 10° до 50° — зона отримання нестабільних характеристик виробу. Поздовжня жорсткість значною мірою залежить від кута намотування. Область від 0 до 10° — зона оптимальних значень параметрів і найкраща для формування силового шару.

Важливо зауважити, що волокна в одному силовому шарі необхідно розмістити в одній площині (без переплетення). При цьому мінімізується кількість сполучного у складі виробу, поліпшується об'ємна щільність.

Для внутрішнього і зовнішнього шарів, що забезпечують прийнятні значення G_{xy} , кут армування доцільно вибирати в діапазоні 20°...45° [1].

Виходячи з вищевикладеного, для досягнення необхідних пружно-міцнісних і теплофізичних характеристик оптимальною схемою армування виробу буде варіант $\pm 45^{\circ}/\pm 10^{\circ}/\pm 45^{\circ}$.

СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ТРУБ

Для усунення недоліків способів [4, 5], зазначених вище, що призводять до провисання армувального волокна на оправці, яка забезпечує геометричну форму, був розроблений спосіб, що дозволяє створити трубу з ПКМ з кутами армування внутрішнього силового шару $\pm 10^{\circ}$. Спосіб базується на технології мокрого намотування вуглецевого волокна, комбінованого з викладенням пакета внутрішніх силових шарів.

Технологічний процес виготовлення вуглепластикових труб складається з таких операцій:

• на технологічний барабан, встановлений на намотувальний верстат, кільцевими шарами намотується пакет силового шару з кутами орієнтації волокна $\pm 90^{\circ} \pm \phi^{\circ}$, після чого відносно поздовжньої осі намотування зрізається утворений пакет;

 встановлюється оправка, що утворює геометричну форму труби, і намотуються внутрішні шари ±45°. На поверхню оправки викладається пакет з квазіпоздовжнім напрямком волокна. Після викладення пакета оправка, що утворює геометричну форму труби, поміщається у пристрій, який формує зовнішню геометрію труби для часткового зшивання полімерної матриці;

• після закінчення режиму часткового зшивання на поверхню оправки намотуються зовнішні шари з орієнтацією волокна ±45°, після чого виконується остаточне зшивання полімерної матриці виробу. Після закінчення режиму труба знімається з оправлення. На рис. 5 зображено кінцевий виріб.

Даний спосіб дозволяє виготовляти труби з квазіпоздовжнім розташуванням волокон (менше 1°).

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНО-МІЦНІСНИХ І ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для випробувань було використано вуглепластикову трубу з поперечним перетином 28×28×2 мм з внутрішнім радіусом заокруглення кутів 5 мм. Зразок труби був виготовлений з вуглецевого волокна Toho Tenax IMS65 і епоксидної трикомпонентної системи Araldite® LY 11135-1 A / Aradur®917 CH / Accelerator 960-1 HUNTSMAN.

Цілями випробувань були:

• визначення межі міцності і модуля пружності при згині;



Рис. 5. Труба квадратного перерізу з ПКМ

• визначення межі міцності і модуля пружності при крученні;

• визначення межі міцності і модуля пружності при стисненні;

• визначення коефіцієнта температурного розширення.

За результатами проведених випробувань було проведено порівняльний аналіз отриманих даних для зразків вуглепластикових труб зі схемами армування $\pm 56^{\circ}/\pm 25^{\circ}/\pm 56^{\circ}$ і $\pm 45^{\circ}/\pm 10^{\circ}/\pm 45^{\circ}$. Результати наведено у таблиці.

З аналізу експериментальних характеристик матеріалів труб і порівняння їх з характеристиками випливає, що отриманий характер залеж-

Схема армування		$\pm 56^{\circ}/\pm 25^{\circ}/\pm 56^{\circ}$	$\pm 56^{\circ}/\pm 25^{\circ}/\pm 56^{\circ}$	$\pm 45^{\circ} / \pm 10^{\circ} / \pm 45^{\circ}$	$\pm 56^{\circ}/\pm 25^{\circ}/\pm 56^{\circ}$	$\pm 45^{\circ} / \pm 10^{\circ} / \pm 45^{\circ}$
Розмір	зовнішній розмір, мм	31.00	28.66	27.99	28.30	28.05
зразка	внутрішній розмір, мм	23.63	23.42	23.30	24.13	23.93
	товщина стінки, мм	3.68	2.62	2.35	2.09	2.06
	площа перетину труби, мм ²	392.98	222.3	208.2	_	_
Щільніс	ть, г/см ³	1.42	1.50	1.39	1.48	1.39
KTP, 1/K		83×10^{-7}	4.29×10^{-7}	5.25×10^{-7}	_	_
Межа мі (МПа)	цності при згині, кг/см ²	_	_	—	1953.57 (191.58)	2315.06 (227.03)
Модуль	пружності при згині, ГПа	_	_	_	51.80	85.30
Досягну стискани	га поздовжня напруга при ні, кг/см ² (МПа)	2290.19 (224.59)	2744.04 (269.10)	3122.00 (306.15)	_	—
Модуль і кг/мм ² (1	пружності при стисканні, ГПа)	_	5301 (51.99)	7572 (74.26)	_	—
Модуль : (ГПа)	зсуву при крученні, кг/мм ²	_	3642.5 (35.72)	2110 (20.69)	_	
1		1	1		1	

Підсумкова таблиця результатів випробувань зразків



Рис. 6. Теоретична залежність модуля пружності матеріалу труб від кутів орієнтації вуглецевого волокна

ностей модуля пружності матеріалу дослідних зразків труби від кута орієнтації волокон корелює з теоретичними розрахунками, наведеними на рис. 6.

Слід зазначити, що у зразках труби з проміжними шарами під кутами $\pm 10^{\circ}$ щільність становить 1.9 г/см³, тобто процентний вміст смоли завищено (~65 % замість потрібних 30...40 %), а процентний вміст волокон занижено (~35 % замість потрібних 60...70 %). Отже, є резерв для досягнення розрахункових показників: модуль пружності труби безпосередньо залежить від процентного вмісту волокон, оскільки модуль пружності смоли всього 3.1 ГПа, а її внесок у модуль пружності композиційного матеріалу при підвищеному вмісті становив 2 і 1 ГПа при нор-

мальному вмісті. Таким чином, очікуваний мінімальний модуль пружності зразків труби з проміжними шарами $\pm 10^{\circ}$ (при найменшій з допустимих об'ємних часток волокна 60 %) дорівнює

$$E_{10^{\circ}} = (74.3 - 2) \cdot \frac{60\%}{35\%} + 1 = 125 \ \Gamma \Pi a$$

При застосуванні проміжних шарів з квазінульовим напрямком волокон модуль пружності буде більшим, ніж при орієнтації волокон цих шарів під кутами $\pm 10^{\circ}$.

Труби з проміжними шарами $\pm 25^{\circ}$ не мають резерву для досягнення розрахункових показників, оскільки вміст волокон там 50 %, що вже близько до норми (60...70 %), а поздовжній модуль пружності, порівняно з необхідним, дуже малий. При правильному співвідношенні компонентів мінімальний модуль буде дорівнювати

$$E_{25^\circ} = (51.8 - 1) \cdot \frac{60\%}{50\%} + 1 = 62 \ \Gamma \Pi a.$$

висновки

В ході виконання роботи було знайдено схему армування, що відповідає всім вимогам фізико-механічних і теплофізичних характеристик стрижневих елементів рамних і фермових силових конструкцій. На основі отриманих вихідних даних з необхідними схемами армування вироби було розроблено технологію виготовлення труб квадратного і прямокутного перетину.

За результатами технологічного відпрацювання були отримані зразки вуглепластикових труб перетином 28×28 мм, на яких були визначені пружно-міцнісні і теплофізичні характеристики та проведено порівняльний аналіз з трубами зі схемою армування $\pm 56^{\circ}/\pm 25^{\circ}/\pm 56^{\circ}$. Після проведеного аналізу була підтверджена залежність фізико-механічних характеристик від схеми армування.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Карпов Я. С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов. Харків: ХАІ, 2010.
- 2. Коваленко В. А., Малков И. В., Сировой Г. В., Сохач Ю. В. Исследование терморазмеростабильности ферменных конструкций космических аппаратов. Харьков: Нац. аерокосмичный ун-т., 2011. С. 20—34.
- 3. Малков І. В. Научные основы технологии формообразования намоткой углепластиковых элементов ферменных конструкций космических аппаратов: дис. ... д-ра техн. наук. Луганск, 2001. 451 с.

- Пат. RU 2415329, МПК F16L9/12. Капустин А. С., Феруленко А. В., Сехин В. А. и др. Способ изготовления трубы из композиционных материалов; заяв. 19.06.2009, опубл. 27.03.2011. URL: https://yandex.ru/patents/doc/ RU2415329C2 20110327 (дата звернення 06.08.2019).
- 5. Пат. RU 2075389. Яиков В. П., Рожков В. Б., Плотников В. И. и др. Способ изготовления трубы из композиционного материала и труба, изготовленная этим способом; заяв. 02.12.1993, опубл. 20.03.1997. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2075389C1_19970320 (дата звернення 06.08.2019).

Стаття надійшла до редакції 06.08.2019

REFERENCES

- 1. Karpov Ya. S. (2010). Designing of parts and assemblies from composites. Kharkov: KhAI.
- 2. Kovalenko V. A., Malkov I. V., Syrova G. V., Sochach Yu. V. (2011). *Study of thermal stability of spacecraft truss structures*. Kharkov: National Aerospace University.
- 3. Malkov I. V. (2001). The scientific basis of the technology of shaping the winding of carbon-fiber plastic elements of spacecraft trusses: dis. ... Dr. of technical Sciences.
- 4. Pat. RU 2415329 of the Russian Federation IPC F16L9 / 12 "A method of manufacturing a pipe from composite materials" [Electronic resource]: Kapustin A. S., Ferulenko A. V., Sekhin V. A. and others., stated. 06/19/2009, published. 03/27/2011. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2415329C2_20110327 (Last accessed: 06.08.2019).
- Pat. RU 2075389 of the Russian Federation "A method of manufacturing a pipe from a composite material and a pipe manufactured by this method" [Electronic resource]: Yaakov V. P., Rozhkov V. B., Plotnikov V. I. and others., stated. 12/02/1993, publ. 03/20/1997. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2075389C1_19970320 (Last accessed: 06.08.2019).

Received 06.08.2019

S. Odaisky¹, Engineer

*O. Potapov*¹, Dr. in Tech. Sci., Head of the Department of New Materials and Advanced Technologies, Acad. of the International Academy of Astronautics, Acad. of the Academy of Technical Sciences, Laurante of the State Awards in Science and Technology of Ukraines

Laureate of the State Awards in Science and Technology of Ukraines

*S. Fedorenko*², Head of Group

A. Shchudro¹, Leading Designer

A. Kulik¹, Designer

¹ Yuzhnoye State Design Office

3 Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

² Dnipro representative office of the General Customer – State Space Agency of Ukraine

1 Krivorizka Str., Dnipro, 49047 Ukraine

A METHOD OF MANUFACTURING PIPES FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS FOR AIRCRAFT STRUCTURES

The frame power structures are widely applied when designing aircraft, in which composite rod elements are used to reduce the mass and size characteristics. To solve the problem of manufacturing rod elements from polymer composite materials, we developed a technology for the manufacture of carbon fiber pipes using an existing machine for winding carbon fiber, which provides the necessary strength and rigidity mainly in the longitudinal direction.

When calculating the rod elements, all the loads that will affect the structure as well as the coefficient of thermal expansion should be taken into account. To achieve the required physical, mechanical, and thermophysical characteristics, the optimal scheme of reinforcement is the scheme with a quasi-longitudinal direction of the fibers. We developed the method of manufacturing based on the technology allowing us to obtain a reinforcement scheme with fiber orientation in the quasi-longitudinal direction with a reinforcement angle of about 1° by a combined method of layer-by-layer winding of carbon fiber. As a result of technological testing, we obtained samples of carbon fiber rod elements, which were used to confirm the calculated characteristics.

To confirm the physico-mechanical and thermophysical characteristics, we determined the assessment of limit of strength and modulus of elasticity in bending, the limit of strength and modulus of elasticity in torsion, the limit of strength and modulus of elasticity in compression, and the coefficient of thermal expansion. The obtained characteristics of the dependences of the elasticity modulus of the pipe prototype material at the fibers' orientation angle correlate with theoretical calculations. The presented method has the patent UA 128613 U.

Keywords: rod elements, pipe, carbon plastic, winding the carbon fiber, diagram of reinforcement.

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.028 УДК 539.3

А. П. ДЗЮБА^{1,2}, проф. кафедри теор. та комп'ютерної механіки, д-р техн. наук, голов. наук. співроб., Заслужений діяч науки і техніки України, Відмінник освіти України, нагороджений медалями: «За заслуги перед містом Дніпро», «За заслуги» ДП КБ «Південне», «За заслуги» Ін-ту технічної механіки НАНУ і ДКАУ, «Академік Володимир Моссаковський», орденом «За підтримку науки» Міжнар. фонду «Планета Альфреда Нобеля», Золотою медаллю «За досягнення» Укр. акад. соціального прогресу і творчості E-mail: dzb@ ua.fm

В. М. СІРЕНКО², заст. голов. конструктора, нач. комплексу з питань балістики, динаміки, аеродинаміки, газодинаміки, навантажень і міцності, канд. техн. наук. Лауреат Державної премії України, Лауреат премії Ленінського комсомолу, Заслужений працівник промисловості України, акад. Міжнародної академії астронавтики Е-mail: V.N.SiRENKO@i.ua

Д. В. КЛИМЕНКО², нач. відділу міцності, навантажень і динамічних характеристик,

канд. техн. наук. Лауреат Державної премії України

E-mail: KLYMENKO_DV@hotmail.com

Л. Д. ЛЕВИТІНА¹, зав. навчальної лабораторії Обчислювальної механіки і міцності конструкцій кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки. Нагороджена медалями: «Академік Володимир Моссаковський», «За вірну службу ДНУ» E-mail: LDLora@i.ua **Д. А. ЧЕРЕНКОВ**², інж. відділу міцності, навантажень і динамічних характеристик E-mail: cherenkovd@gmail.com ¹ Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Проспект Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49010

² Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

ОПТИМІЗАЦІЯ КОМПОЗИТНИХ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ МЕТОДАМИ ТЕОРІЇ ОПТИМАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

Розглянуто задачу вагової оптимізації параметрів виготовленої методом неперервної перехресної намотки багатошарової композитної оболонки обертання при осесиметричному навантаженні. Шари оболонки розташовані симетрично відносно серединної поверхні. Як параметри прийнято змінні уздовж меридіана кути намотування армувального матеріалу і товщина шарів. Запропоновано алгоритм автоматизованого визначення пружних постійних композитного матеріалу змінної уздовж меридіана кути намотування армувального матеріалу з товщина шарів. Запропоновано алгоритм автоматизованого визначення пружних постійних композитного матеріалу змінної уздовж меридіана оболонки инізотропії. Враховано зв'язок структури композитного матеріалу з технологічним процесом виготовлення оболонки шляхом її намотування армувальною стрічкою під різними кутами до осі обертання. Як вихідні використовуються значення чотирьох пружних постійних, отриманих в результаті експериментального випробування зразків-свідків композитного матеріалу уздовж і ортогонально армуванню. Отримано рівняння стану моментної теорії оболонок змінної уздовж меридіана ортотропії і товщини стінки як крайової задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Застосування необхідних умов оптимальності у формі принципу максимуму Понтрягіна при наявності довільних фазових обмежень дозволило звести багатопараметричну задачу до послідовності

Цитування: Дзюба А. П., Сіренко В. М., Клименко Д. В., Левитіна Л. Д., Черенков Д. А. Оптимізація композитних оболонок обертання методами теорії оптимальних процесів. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 28—37. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.028

екстремальних задач суттєво меншої розмірності. Такий підхід суттєво спрощує врахування умов міцнісної надійності та технологічних і конструктивних вимог реального проєктування і процес відшукання оптимального проєкту у цілому. Приведено результати оптимізації двошарової склопластикової оболонки обертання у вигляді зміни розподілу товщини шарів та кута намотки скловолокна. Матеріали дослідження можна використати для зниження матеріаломісткості елементів конструкцій ракетно-космічної техніки та в інших галузях.

Ключові слова: композитна оболонка обертання, кути намотування, товщина шарів, усереднені механічні характеристики, вагова оптимізація, принцип максимуму Понтрягіна.

ВСТУП

Високі експлуатаційні характеристики тонкостінних конструкцій з композитних матеріалів, а також можливості сучасних технологій виготовлення композитних оболонок досить складної форми зі змінними параметрами і, зокрема, зі змінною товшиною шарів (методом безперервного намотування з включеннями), а також можливості реалізації фактично довільних схем армування зумовлюють все більш широке їхнє використання в різних галузях сучасного машинобудування [4, 9—13, 17]. Наявність досить ефективних алгоритмів прямого розрахунку таких конструкцій дозволяють не тільки широко використовувати математичні методи відшукання їхніх оптимальних параметрів, а й реалізовувати такі проєкти у практиці проєктування і виготовлення реальних конструктивних елементів з композитних матеріалів.

МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ

Розглядається довільна оболонка обертання, виготовлена з односпрямованих армувальних ниток методом безперервного перехресного намотування. Приймається, що стінка оболонки зібрана з *п* шарів, симетрично розташованих відносно її серединної поверхні, а кожен шар складається з ниток, розташованих почергово під кутами $\pm \phi_i$ (*i* = 1, ..., *n*) до осі оболонки. Таким чином, структура матеріалу оболонки обертання безпосередньо пов'язана з технологічним процесом виготовлення конструкції (шляхом її намотування армувальною стрічкою (ниткою), попередньо просоченою сполучною речовиною з подальшою полімеризацією), і визначається змінними вздовж меридіана оболонки кутами армування $\phi_i = \phi_i(s)$ і відповідними товщинами шарів $h_i = h_i(s)$.

При цьому

$$\begin{split} \phi_i^{\scriptscriptstyle H}(s) &\leq \phi_i(s) \leq \phi_i^{\scriptscriptstyle B}(s) ,\\ h_i^{\scriptscriptstyle H}(s) &\leq h(s) \leq h_i^{\scriptscriptstyle B}(s) ,\\ &\sum_i^n h_i(s) = h, \end{split}$$
(1)

де $\phi_i^{\rm H}(s)$, $\phi_i^{\rm B}(s)$ — деякі граничні значення кутів намотування, які визначаються формою поверхні оболонки, натягом стрічки та іншими параметрами технологічного процесу виготовлення оболонки, $h_i^{\rm H}(s)$, $h_i^{\rm B}(s)$, h(s) — граничні значення товщини *i*-х шарів і всього пакета з *n* шарів відповідно.

Вибір критерію міцності виготовленого таким чином композитного матеріалу оболонки — окрема досить складна проблема. Справа в тому, що відомими критеріями міцності реальний процес руйнування композитного матеріалу описується все ще недостатньо достовірно. Це пов'язано з тим, що руйнування композитів визначається безліччю факторів: розривом волокон в зонах розтягування, втратою їхньої стійкості при стисканні, розшаруванням між сполучним і армувальним матеріалом або окремими шарами, розтріскуванням наповнювача, утворенням і розвитком тріщин, а також появою інших пошкоджень різної природи і в різній послідовності. Тому при оцінці міцності неоднорідних композитних конструкцій їхній матеріал часто наділяється деякими усередненими механічними характеристиками і відповідними властивостями міцності. Одним з таких критеріїв є енергетичний критерій Хілла [11, 16]:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_1^*}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_1^{*2}} + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_2^*}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12}^*}\right)^2 \le 1, \qquad (2)$$

де $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$ — розрахункові значення напруг, $\sigma_1^*, \sigma_2^*, \tau_{12}^*$ — межі міцності матеріалу при розтягуванні-стисненні уздовж армувальних елементів, упоперек них і при випробуваннях на зсув. При цьому міцність матеріалу при розтягуванні і стисненні вважається однаковою. У ряді випадків з метою зменшення обчислювальної витратності пошукового алгоритму, що важливо в задачах пошуку оптимального розташування ниток по траєкторіях максимальних головних напружень, як окремий випадок (2) використовується ще простіша перша теорія міцності:

$$\sigma_1 = \sigma_1^* \leq [\sigma],$$

$$\sigma_2 = \sigma_2^* \leq [\sigma].$$

Визначення пружних сталих композитного матеріалу часто здійснюється шляхом заміни вихідного гетерогенного матеріалу деяким умовним однорідним анізотропним (ортотропним) середовищем. Різні варіанти підходу до усереднення механічних характеристик такого анізотропного матеріалу грунтуються, як правило, на розрахунково-експериментальних методиках [1, 5—7, 14—16, 18].

У поданій роботі за досліджуваний елемент приймається смужка, виділена з окремого шару, що перебуває в умовах плоского напруженого стану та наділяється певними властивостями жорсткості при розтягуванні-стисненні у двох ортогональних напрямках і зсуві.

В однонапрямленому (армованому в одному напрямку) шарі матеріалу напруги σ_1^i сприймаються волокнами, а σ_2^i, τ_{12}^i — наповнювачем.

Основні фізичні співвідношення для і-го шару в системі координат, пов'язаній з напрямком армування, можуть бути подані співвідношеннями узагальненого закону Гука [1, 11]:

Ці ж співвідношення для напруг мають вигляд

$$\sigma_{1}^{i} = \overline{E}_{1}^{i} (\varepsilon_{1}^{i} + \mu_{12}^{i} \varepsilon_{2}^{i}),$$

$$\sigma_{2}^{i} = \overline{E}_{2}^{i} (\varepsilon_{2}^{i} + \mu_{21}^{i} \varepsilon_{1}^{i}),$$

$$\tau_{12}^{i} = G_{12}^{i} \varepsilon_{12}^{i},$$

$$\overline{E}_{j}^{i} = E_{j}^{i} / (1 - \mu_{12}^{i} \mu_{21}^{i}), \quad j = 1, 2.$$
(4)

При цьому чотири пружні постійні для кожного шару (E_1^i, E_2^i — модулі пружності при навантаженні в напрямку армування і в ортогональному напрямку відповідно, G_{12}^i — модуль зсуву, μ_{12}^i — коефіцієнт Пуассона) визначаються експериментально, а інший коефіцієнт Пуассона μ_{21}^i можна знайти із умови симетрії

$$E_1^i \mu_{12}^i = E_2^i \mu_{21}^i.$$

Розглянемо тепер елемент, складений з *n* шарів, кожен з яких визначається своєю товщиною h_i і кутом армування ϕ_i у системі координат (α , β). Складові $\sigma_{\alpha}^i, \sigma_{\beta}^i, \tau_{\alpha\beta}^i$ напружень для окремих шарів можна виразити через напруження вздовж і упоперек волокон кожного *i*-го шару з умов рівноваги елемента, розташованого на похилій площині в осях (α , β) під кутом ϕ_i , у такий спосіб:

$$\sigma_{\alpha}^{i} = \sigma_{1}^{i} \cos^{2} \phi_{i} + \sigma_{2}^{i} \sin^{2} \phi_{i} + \tau_{12}^{i} \sin 2\phi_{i} ,$$

$$\sigma_{\beta}^{i} = \sigma_{1}^{i} \sin^{2} \phi_{i} + \sigma_{2}^{i} \cos^{2} \phi_{i} + \tau_{12}^{i} \sin 2\phi_{i} ,$$

$$\tau_{\alpha\beta}^{i} = (\sigma_{1}^{i} - \sigma_{2}^{i}) \sin \phi_{i} \cos \phi_{i} .$$
(5)

Аналогічним чином можна подати і зв'язок деформацій $\varepsilon_1^i, \varepsilon_2^i, \varepsilon_{12}^i$ волокон і наповнювача на майданчиках, розгашованих під кутом ϕ_i , через деформації $\varepsilon_{\alpha}^i, \varepsilon_{\beta}^i, \varepsilon_{\alpha\beta}^i$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1}^{i} &= \varepsilon_{\alpha}^{i} \cos^{2} \phi_{i} + \varepsilon_{\beta}^{i} \sin^{2} \phi_{i} + \varepsilon_{\alpha\beta}^{i} \sin \phi_{i} \cos \phi_{i} ,\\ \varepsilon_{2}^{i} &= \varepsilon_{\alpha}^{i} \sin^{2} \phi_{i} + \varepsilon_{\beta}^{i} \cos^{2} \phi_{i} - \varepsilon_{\alpha\beta}^{i} \sin \phi_{i} \cos \phi_{i} , \quad (6)\\ \varepsilon_{12}^{i} &= (\varepsilon_{\beta}^{i} - \varepsilon_{\alpha}^{i}) \sin 2 \phi_{i} + \varepsilon_{12}^{i} \cos 2 \phi_{i} . \end{aligned}$$

Приймається також, що в умовах плоского напруженого стану напруження по товщині кожного шару будуть постійними, тобто деформації окремих шарів будуть однаковими.

У цих умовах зусилля N_{α} , N_{β} , $N_{\alpha\beta}$ в серединній поверхні в глобальних координатах (α , β) дорівнюють

$$V_{\alpha} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{\alpha}^{i} h_{i} , N_{\beta} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{\beta}^{i} h_{i} ,$$
$$N_{\alpha\beta} = \sum_{i=1}^{n} \tau_{\alpha\beta}^{i} h_{i} .$$
(7)

При цьому зусилля N_{α} , N_{β} , $N_{\alpha\beta}$ пов'язані через узагальнені жорсткості $B_{i,j}$ (i, j = 1, 2, 3) з відповідними рівними для всіх шарів деформація-^{МИ} $\varepsilon_{\alpha}^{i}, \varepsilon_{\beta}^{i}, \varepsilon_{\alpha\beta}^{i}$ елемента в координатах (α, β) спів-

відношеннями

$$N_{\alpha} = B_{11}\varepsilon_{\alpha} + B_{12}\varepsilon_{\beta} + B_{13}\varepsilon_{\alpha\beta} ,$$

$$N_{\beta} = B_{21}\varepsilon_{\alpha} + B_{22}\varepsilon_{\beta} + B_{23}\varepsilon_{\alpha\beta} ,$$

$$N_{\alpha\beta} = B_{31}\varepsilon_{\alpha} + B_{32}\varepsilon_{\beta} + B_{33}\varepsilon_{\alpha\beta} .$$

(8)

Підставляючи $\varepsilon_1^i, \varepsilon_2^i, \varepsilon_{12}^i, 3$ (6) у вирази (4), а обчислені у (4) величини $\sigma_1^i, \sigma_2^i, \tau_{12}^i - y$ (5), і далі $\sigma_{\alpha}^i, \sigma_{\alpha}^i, \tau_{\alpha\beta}^i - y$ (7), з урахуванням (8) можна отримати вирази для узагальнених жорсткостей у вигляді [1, 11]

$$B_{11} = \sum_{i=1}^{n} h_i (\overline{E}_1^i \cos^4 \phi_i + 2\overline{E}_1^i \mu_{12}^i \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + \overline{E}_2^i \sin^4 \phi_i + G_{12}^i \sin^2 2\phi_i),$$

$$B_{12} = B_{21} = \sum_{i=1}^{n} h_i [(\overline{E}_1^i + \overline{E}_2^i) \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + \overline{E}_1^i \mu_{12}^i (\cos^4 \phi_i + \sin^4 \phi_i) - G_{12}^i \sin^2 2\phi_i],$$

$$B_{22} = \sum_{i=1}^{n} h_i (\overline{E}_1^i \sin^4 \phi_i + \overline{E}_2^i \cos^4 \phi_i + 2\overline{E}_1^i \mu_{12}^i \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + G_{12}^i \sin^2 2\phi_i), \quad (9)$$

$$B_{13} = B_{31} = \sum_{i=1}^{n} h_i \sin \phi_i \cos \phi_i \times \\\times [\overline{E}_1^i (1 - \mu_{12}^i) \cos^2 \phi_i - \\- \overline{E}_2^i (1 - \mu_{21}^i) \sin^2 \phi_i - 2G_{12}^i \cos 2\phi_i],$$
$$B_{23} = B_{32} = \sum_{i=1}^{n} h_i \sin \phi_i \cos \phi_i \times \\\times [\overline{E}_1^i (1 - \mu_{12}^i) \sin^2 \phi_i - \\- \overline{E}_2^i (1 - \mu_{21}^i) \cos^2 \phi_i + 2G_{12}^i \cos 2\phi_i],$$
$$B_{33} = \sum_{i=1}^{n} h_i [(\overline{E}_1^i + E_2^i - 2\overline{E}_1^i \mu_{12}^i) \times \\\times \sin^2 \phi_i \cos^2 \phi_i + G_{12}^i \cos^2 2\phi_i].$$

Якщо ввести середні напруження для пакета з *n* шарів при плоскому напруженому стані

$$\sigma_{\alpha} = N_{\alpha} / h, \quad \sigma_{\beta} = N_{\beta} / h, \quad \tau_{\alpha\beta} = N_{\alpha\beta} / h, \quad (10)$$

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

де h — сумарна товщина пакета (див. вираз (1)), та розв'язуючи далі (8) відносно деформацій $\varepsilon_{\alpha}, \varepsilon_{\beta}, \varepsilon_{\alpha\beta}$ з урахуванням (9) і прирівнюючи їх деформаціям, виписаним за законом Гука у вигляді, аналогічному (3), в координатах (α , β) для пакета з n шарів, можна отримати середні модулі пружності для довільної схеми армування [11]:

$$E_{\alpha} = B / (B_{22}B_{33} - B_{23}^{2}),$$

$$E_{\beta} = B / (B_{11}B_{33} - B_{13}^{2}),$$

$$G_{\alpha\beta} = B / (B_{11}B_{22} - B_{12}^{2}),$$

$$\mu_{\alpha\beta} = (B_{12}B_{33} - B_{13}B_{23}) / (B_{11}B_{33} - B_{13}^{2}), \quad (11)$$

$$\mu_{\beta\alpha} = (B_{12}B_{33} - B_{13}B_{23}) / (B_{22}B_{33} - B_{23}^{2}),$$

$$B = [(B_{11}B_{22} - B_{12}^{2})B_{33} + 2B_{12}B_{13}B_{23} - B_{11}B_{23}^{2} - B_{11}B_{23}^{2} - B_{22}B_{13}^{2}]/h.$$

Таким чином, підставляючи значення фізико-механічних характеристик матеріалу шару вздовж і впоперек волокон $E_1^i, E_2^i, G_{12}^i, \mu_{12}^i, \mu_{21}^i$, які попередньо визначаються експериментально, а також товщини шарів h_i та реальних кутів намотки волокна ϕ_i в (9), і далі — в (11), отримуємо фізико-механічні характеристики матеріалу у напрямках координат (α , β).

Для розглянутого в роботі випадку симетричного армування, при якому структура матеріалу утворюється парами однакових шарів, розташованих під кутами $\pm \phi_i$, рівності (8) набувають вигляду

$$N_{\alpha} = B_{11}\varepsilon_{\alpha} + B_{12}\varepsilon_{\beta} ,$$

$$N_{\beta} = B_{21}\varepsilon_{\alpha} + B_{22}\varepsilon_{\beta} ,$$

$$N_{\alpha\beta} = B_{33}\varepsilon_{\alpha\beta} ,$$
(12)

а закон Гука —

$$\epsilon_{\alpha} = \frac{\sigma_{\alpha}}{E_{\alpha}} - \mu_{\alpha\beta} \frac{\sigma_{\beta}}{E_{\beta}},$$

$$\epsilon_{\beta} = \frac{\sigma_{\beta}}{E_{\beta}} - \mu_{\beta\alpha} \frac{\sigma_{\alpha}}{E_{\alpha}},$$
(13)
$$\epsilon_{\alpha\beta} = \frac{\tau_{\alpha\beta}}{G_{\alpha\beta}}.$$

31

Середні пружні постійні матеріалу в цьому випадку можуть бути обчислені у вигляді

$$E_{\alpha} = (B_{11} - B_{12}^{2} / B_{22}) / h ,$$

$$E_{\beta} = (B_{22} - B_{12}^{2} / B_{11}) / h ,$$

$$G_{\alpha\beta} = B_{33} / h ,$$
 (14)

$$\mu_{\alpha\beta} = B_{12} / B_{11} ,$$

$$\mu_{\beta\alpha} = B_{12} / B_{22} .$$

Виписані вище пружні постійні E_{α} , E_{β} , $G_{\alpha\beta}$, $\mu_{\alpha\beta}$, $\mu_{\beta\alpha}$, B_{ij} є функціями товщини $h_i = h_i(s)$ і кутів намотування $\phi_i = \phi_i(s)$, тобто керованими проєктними параметрами реального технологічного процесу виготовлення відповідного оболонкового елемента, раціональні значення яких можуть бути обрані відповідно до прийнятих критеріїв якості при виконанні умов міцності.

ЗАДАЧА РОЗРАХУНКУ ОБОЛОНКИ ОБЕРТАННЯ

Задача розрахунку виготовленої методом безперервного намотування анізотропної оболонки обертання, що перебуває під дією довільного осесиметричного навантаження, вирішується у припущенні лінійної залежності між компонентами напруженого стану і пружних деформацій, а також справедливості співвідношень Коші зв'язку деформацій з переміщеннями.

При виведенні рівнянь стану оболонка вважається тонкою, пружною, має сумарну товщину h симетрично розташованих відносно серединної поверхні шарів, її шари деформуються без проковзування, а значення фізико-механічних характеристик матеріалу приймаються у меридіональному і навкружному напрямках (головних кривизн) поверхні оболонки, яким відповідають індекси (α , β). У цьому випадку з урахуванням гіпотез Кірхгофа напруження пов'язані з деформаціями і змінами кривизн так:

$$\sigma_{\alpha}^{i} = b_{11}^{i} \varepsilon_{\alpha} + b_{12}^{i} \varepsilon_{\beta} + z (b_{11}^{i} \chi_{\alpha} + b_{12}^{i} \chi_{\beta}),$$

$$\sigma_{\beta}^{i} = b_{12}^{i} \varepsilon_{\alpha} + b_{22}^{i} \varepsilon_{\beta} + z (b_{12}^{i} \chi_{\alpha} + b_{22}^{i} \chi_{\beta}), \qquad (15)$$

де із порівняння (8), (9), (15) для b_{jk}^i мають місце співвідношення

$$B_{jk} = \sum_{i=1}^n b^i_{jk} h_i \; .$$

Вирази для зусиль записуються далі у вигляді (7), а для моментів будуть такими [1]:

$$M_{\alpha} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{\alpha}^{i} h_{i}^{3} / 12,$$

$$M_{\beta} = \sum_{i=1}^{n} \sigma_{\beta}^{i} h_{i}^{3} / 12.$$
(16)

Вирази для зусиль через деформації серединної поверхні оболонки запишуться у вигляді (8), де для розглянутого випадку $B_{13} = B_{23} = 0$, а для моментів будуть мати вигляд

$$M_{\alpha} = D_{11}\chi_{\alpha} + D_{12}\chi_{\beta},$$

$$M_{\beta} = D_{12}\chi_{\alpha} + D_{22}\chi_{\beta},$$
(17)

де

$$D_{jk} = \sum_{i=1}^{2n} b_{jk}^{i} h_{i}^{3} / 12.$$

Рівняння рівноваги і геометричні співвідношення (у припущенні, що впливом зміни кутів намотування уздовж меридіана можна знехтувати) у даному випадку залишаються такими ж, як і для ізотропної оболонки [2].

Виключаючи змінні N_{β}, M_{β} за допомогою (12), (17) та підстановки

$$N_{\beta} = \frac{B_{12}}{B_{11}} N_{\alpha} + \frac{\Delta}{B_{11}} \varepsilon_{\beta} ,$$
$$M_{\beta} = \frac{D_{12}}{D_{11}} M_{\alpha} + \frac{\Omega}{D_{11}} \chi_{\beta} ,$$

де $\Delta = B_{11}B_{22} - B_{12}^2$; $\Omega = D_{11}D_{22} - D_{12}^2$, рівняння стану анізотропної багатошарової оболонки можуть бути отримані через компоненти вектора основних змінних:

$$\overline{u} = (\xi, \vartheta, N_r, M_{\alpha} r, \zeta), \qquad (18)$$

де ξ , ζ , ϑ — радіальне і осьове переміщення та кут повороту нормалі меридіана оболонки, N_r розпірна сила, M_{α} — вигинальний момент у напрямку меридіана, r(s), $\theta(s)$ — радіус паралельного кола і кут між нормаллю до меридіана оболонки і її віссю відповідно. Ці параметри пов'язані співвідношеннями

$$\frac{d\xi}{ds} = \varepsilon_{\alpha} \cos\theta - \vartheta \sin\theta ,$$

$$\frac{d\zeta}{ds} = \varepsilon_{\alpha} \sin\theta + \vartheta \cos\theta ,$$

$$N = N_{\alpha} \cos\theta + Q \sin\theta ,$$

де *Q* — інтенсивність поперечної сили в нормальному до меридіана перетині.

У цих умовах, вибираючи за зміну інтегрування довжину меридіана s ($s_0 \le s \le s_L$), аналогічно [2] отримуємо систему звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами:

$$\frac{d\xi}{ds} = -\frac{B_{12}}{B_{11}} \frac{\cos\theta}{r} \xi - 9\sin\theta + + \frac{\cos^2\theta}{c_{11}r} Nr + \frac{F(s)}{2\pi} \frac{\sin 2\theta}{2B_{11}r} , \frac{d\theta}{ds} = -\frac{D_{12}}{D_{11}} \frac{\cos\theta}{r} \theta + \frac{1}{D_{11}r} M_{\alpha}r , \frac{d(Nr)}{ds} = \frac{\Delta}{B_{11}} \xi + \frac{B_{12}}{B_{11}} \frac{\cos\theta}{r} Nr + + \frac{B_{12}}{B_{11}} \frac{\sin\theta}{r} \frac{F(s)}{2\pi} - rq_r ,$$
(19)

$$\frac{d(M_{\alpha}r)}{ds} = \frac{\Omega}{D_{11}} \frac{\cos^2\theta}{r} \vartheta + \sin\theta Nr + \frac{D_{12}}{D_{11}} \frac{\cos\theta}{r} (M_{\alpha}r) - \cos\theta \frac{F(s)}{2\pi},$$
$$\frac{d\zeta}{d\zeta} = -\frac{B_{12}}{2\pi} \sin\theta \cdot \frac{\xi}{2\pi} + \vartheta\cos\theta + \frac{1}{2\pi} \sin\theta \cdot \frac{\xi}{2\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin\theta$$

$$ds \qquad B_{11} \qquad r$$
$$+\frac{1}{B_{11}}\frac{\sin 2\theta}{2r}Nr + \frac{\sin^2 \theta}{B_{11}}\frac{F(s)}{2\pi}.$$

Тут $q_r = q_{\alpha} \cos \theta + q_{\beta} \sin \theta$ — радіальна складова зовнішнього навантаження, F(s) — сумарне осьове навантаження на виділену частину оболонки.

Система (19) доповнюється крайовими умовами, що відповідають умовам закріплення торців оболонки:

$$\Psi(\overline{u}(s_0)) = 0, \ \overline{u}(s_0) \in U_0,$$

$$\overline{\Psi}(\overline{u}(s_L)) = 0, \ \overline{u}(s_L) \in U_L.$$
(20)

У поданому вигляді система рівнянь (19) збігається з системою рівнянь для ізотропної оболонки [2] з точністю до коефіцієнтів.

НЕОБХІДНІ УМОВИ ОПТИМАЛЬНОСТІ

Задача оптимального проєктування виготовленої перехресною намоткою багатошарової ком-

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

позитної оболонки обертання інтерпретується як задача оптимального управління і полягає у знаходженні змінних уздовж меридіана товщини $h_i(s)$ і (або) кутів $\phi_i(s)$ намотування волокон.

Завдання [3, 8, 9] полягає у знаходженні компонентів вектора оптимального керування $\overline{\delta}(\overline{h}(s), \phi(s), s) \in D_{\delta}$ із умови мінімуму функціонала

$$\int_{s_0}^{s_t} f_0(\overline{u},\overline{\delta},s) \, ds \tag{21}$$

для процесів, що описуються системою диференціальних рівнянь

$$\frac{du_i}{ds} = f_i(\overline{u}, \overline{\delta}, s), \ i = 1, \dots, m ,$$
(22)

з крайовими умовами (20) при наявності обмежень на керування та фазові змінні (зокрема) у вигляді

$$\overline{F(u,\overline{\delta},s)} \le 0.$$
(23)

У задачах оптимізації параметрів конструкцій машинобудування рівняння (22) описують їхній стан, зокрема оболонкових елементів (19), і є лінійними по фазових змінних (або зводяться до них) і нелінійними по керуванню $\overline{\delta}(s)$; крайові умови (20) — це умови закріплення або взаємодії підконструкцій, де $\overline{\psi}(u(s_e))$ — функції крайових умов на лівому $s_0(e=0)$ і правому $s_L(e=L)$ кінцях траєкторії; p_e — кількість крайових умов при s_0 або s_L .

За обмеження приймаються умови міцності (див. (2)), жорсткості, стійкості, конструктивні і технологічні вимоги, більшість з яких можуть бути представлені у вигляді (23).

Необхідні умови оптимальності формулюються у формі принципу максимуму Понтрягіна при наявності фазових обмежень [3]. Розширений гамільтоніан і система для спряжених функцій з крайовими умовами трансверсальності мають вигляд

$$H^* = H + \overline{\mathbf{v}} \cdot \overline{F} , \qquad (24)$$

$$\frac{d\lambda_i}{ds} = -\frac{\partial H}{\partial u_i} - \sum_{j=1}^m v_j(x) \cdot \frac{\partial F_j}{\partial u_i}, \ i = 1, ..., m, \quad (25)$$

$$\overline{\lambda}(s_e) = \sum_{j=1}^{P_e} c_j \operatorname{grad} \Psi_j(\overline{u}(s_e)) , \qquad (26)$$

де $H = \sum_{i=0}^{m} \lambda_i f_i$, $\overline{\lambda}(s)$ — спряжені функції, які задовольняють рівняння (25) з крайовими умовами



Двошарова оболонка обертання (*a*), оптимальні зміни товщини стінки (*б*) і кута намотування (*в*) склострічки композитної оболонки

трансверсальності (26), компонентами векторастовпця \overline{F} є складові *m* узагальнених обмежень (20), \overline{c} , $\overline{v}(s)$ — множники і функції Лагранжа; а оптимальне керування $\overline{\delta}(s)$ ($s \in [s_0, s_L]$) відшукується із умови максимуму гамільтоніана

$$H^{*}(\overline{u}(s), \overline{\lambda}^{*}(s), \overline{\delta}^{*}(s), s) =$$

= $\sup_{\delta \in D_{\delta}} H^{*}(\overline{u}(s), \overline{\lambda}^{*}(s), \overline{\delta}(s), s), \qquad (27)$

що у принципі встановлює залежність $\overline{\delta}^*(s) = \overline{\delta}^*(\overline{u}^*(s), \overline{\lambda}^*(s), s)$, і в ході ітераційного процесу дозволяє визначити $\overline{u}^*(s), \overline{\lambda}^*(s)$, і далі — оптимальне управління $\overline{\delta}^*(s)$ для всіх $s_0 \le s \le s_L$.

Таким чином, застосування підходу дозволяє звести традиційну багатовимірну задачу нелінійного програмування визначення дискретних змінних параметрів (кількість яких дорівнює добутку кількості вузлових точок інтегрування вихідної системи (22), (20) на кількість 2*n* змінних параметрів в цих точках, що для багатошарових оболонок обертання при традиційному підході вирішення скінченно-вимірної задачі оптимізації виявляється, як правило, занадто великим) до наступних етапів ітераційного процесу:

$$\overline{\delta}^{k-1} \to \overline{u}^k \to \overline{\lambda}^k \to \sup_{\overline{\delta}} H \to \overline{\delta}^k$$
(28)

які полягають у послідовному розв'язанні крайових задач для основної (22), (20) і спряженої (25), (26) систем з метою відшукання $\overline{u}^*(s)$, $\overline{\lambda}^*(s)$ і послідовності допоміжних задач нелінійного програмування розмірності 2*n* шляхом максимізації гамільтоніана (27) за варійованими змінними $\overline{\delta}(s)$ у фіксованих (вузлових) точках проміжку інтегрування на кожному кроці ітераційного процесу (28).

Це дозволяє не тільки більш коректно сформулювати вихідну задачу оптимального проєктування, але і спростити процес відшукання параметрів оптимізації шляхом фрагментації задач на прості складові, можливості застосування на окремих етапах аналітичних та аналітико-числових методів досліджень і, таким чином, істотно зменшити обчислювальні витрати на пошук оптимального проєкту в цілому [8, 9].

ЗАДАЧА ВАГОВОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ Композитної оболонки обертання

При осесиметричному навантаженні задача полягає у знаходженні змінної вздовж меридіана товщини стінки h(s) і кута намотування $\pm \phi(s)$ з умови мінімуму обсягу матеріалу

$$V = \min 2\pi \int_{s_0}^{s_L} r(s)h(s)\,ds$$

при виконанні рівнянь стану оболонки у вигляді крайової задачі для системи звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами (19) з крайовими умовами закріплення (20) (рисунок, *a*), наявності обмежень міцності (2) і конструктивних вимог (1).

Як приклад, розглядається задача оптимального розподілу матеріалу виготовленої перехресною намоткою склострічки двошарової оболонки обертання (рисунок, *a*), яка перебуває під рівномірним внутрішнім тиском q_n при наявності обмежень $\sigma_1 \leq [\sigma_1]$; $\sigma_2 \leq [\sigma_2]$; $h \geq h_0$, $\pi/2 \geq \phi(s) \geq \phi_0$.

Параметри оболонки такі:

$$q_n = 9.8 \cdot 10^4 \text{ H/m}^2,$$

$$P_0 = \pi q_n r^2 (s_L),$$

$$E_\alpha = 0.52 \cdot 10^{11} \text{ H/m}^2,$$

$$E_\beta = 0.15 \cdot 10^{11} \text{ H/m}^2,$$

$$\begin{split} \mu_{\alpha} &= 0.242, \ \mu_{\beta} = 0.165, \\ G_{\alpha\beta} &= 0.6 \cdot 10^{10} \text{ H/m}^2, \\ [\sigma_1] &= 11.7 \cdot 10^7 \text{ H/m}^2, \\ [\sigma_2] &= 3.1 \cdot 10^7 \text{ H/m}^2, \\ s_0 &= 0, \ s_L &= 1.08 \text{ m}, \\ r_0 &= 0.788 \text{ m}, \ r_L &= 0.57 \text{ m}, \\ h_0 &= 4 \text{ mm}, \ \phi_0 &= 45^\circ. \end{split}$$

На рисунку б наведено оптимальний розподіл товщини h(s), а на рисунку e — кута намотування склострічки j(s) склопластикової оболонки (рисунок, a), знайдених із умови мінімуму обсягу її матеріалу. З отриманих результатів випливає, що застосування підходу дозволило зменшити вагу композитної оболонки з оптимальними параметрами на 24.3 % у порівнянні з оболонкою постійної товщини при їхній однаковій несучій здатності.

Слід зазначити, що при такому підході досить просто можна розглянути цілий ряд інших задач визначення $h_i(s)$, $\phi_i(s)$, наприклад у таких постановках:

а — мінімуму обсягу матеріалу, необхідного для виготовлення оболонки при наявності обмежень міцності і жорсткості;

δ — мінімуму максимального напруження при заданій вазі матеріалу оболонки і обмеженнях на максимальні переміщення;

в — мінімуму переміщень або кутів повороту нормалі на вільному кінці оболонки, виготовленої з заданої кількості матеріалу при обмеженнях міцності тощо.

Переваги підходу, пов'язаного з використанням необхідних умов оптимальності у формі принципу максимуму Понтрягіна для вирішення зазначених вище задач, обумовлена як наявністю неперервно змінних уздовж меридіана оболонки варійованих параметрів $h_i(s)$, $\phi_i(s)$, так і характером обмежень, які повинні виконуватися для всіх точок $s_0 \le s \le s_L$.

В цілому застосування запропонованого підходу дозволяє звести багатовимірну задачу нелінійного програмування до послідовності задач значно меншої розмірності, що істотно спрощує процес відшукання оптимального проєкту.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Амбарцумян С. А. Общая теория анизотропных оболочек. М.: Наука, 1974. 446 с.
- 2. Бидерман В. Л. Механика тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 488 с.
- 3. Брайсон, Хо Ю-ши. Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1972. 544 с.
- 4. Голушко С. К., Немировский Ю. В. Прямые и обратные задачи механики упругих композитных пластин и оболочек вращения. М.: Физматлит, 2008. 432 с.
- 5. Гребенюк С. Н. Упругие характеристики композитного материала с транстропной матрицей и волокном. *Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла*: зб. наук. праць. 2011. Вип. 12. С. 62—68.
- 6. Гребенюк С. Н. Определение предельного модуля упругости на основе энергетического условия согласования. *Вестн. Херсонского НТУ*. 2012. Вып. 2 (45). С. 106—112.
- Гребенюк С. М., Клименко М. І. Визначення ефективного модуля пружності композита при нормальному розподілі модулів пружності волокна та матриці. Вестн. Херсонского НТУ. 2014. Вып. 3 (50). С. 254—258.
- Дзюба А. П. Метод послідовних набліжень розв'язування задач оптимального керування з обмеженими фазовими координатами для отимізації силових елементів конструкцій. Пробл. обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. 1999. Вип. 5. С. 61—85.
- Дзюба А. П., Сіренко В. М., Дзюба П. А., Сафронова І. А. Моделі та алгоритми оптимізації елементів неоднорідних оболонкових конструкцій. Актуальні проблеми механіки: монографія. Під. ред. М. В. Полякова. Дніпро: Ліра, 2018. С. 225—243.
- Механика композитов: монография в 12 т. Под общ. Ред. А. Н. Гузя. К.: Наукова думка, 1993–2003 гг. Т. 8. Статика элементов конструкцый. Под ред. Я. М. Григоренко. 1999. 379 с.
- 11. Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
- 12. Победря Б. Е. Механика композиционных материалов: Монография. М.: Наука, 1984. 400 с.
- 13. Соломонов Ю. С., Георгиевский В. П., Недбай А. Я., Андрюшин В. А. *Прикладные задачи механики композитных цилиндрических оболочек*. М.: Физматгиз, 2013. 406 с.

- 14. Уитни Д. М. Упругие свойства оболочек, армированных волокнами. *Ракетная техника и космонавтика*. 1967. № 5. С. 170—173.
- 15. Хашин З., Розен Б. Упругие модули материалов, армированных волокнами. *Прикладная механика* (Trans ASME). 1964. № 2. С. 71-82.
- 16. Хилл Р. Теория механических свойств волокнистых композитных материалов. *Мех. ИЛ.* 1966. № 2. С. 131–149.
- 17. Шваб'юк В. І., Ротко С. В. Лінійне деформування, міцність і стійкість композитних оболонок середньої товщини: Монографія. Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2015. 254 с.
- Grebenyuk S. N. The shear modules of composite material with isotropic matrix and a fibre. *J. Appl. Math. and Mech.* 2014.
 78, No. 2. P. 270–276.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2019

REFERENCES

- 1. Ambartsumjan S. A. (1974). General theory of anisotropic shells. Moscow: Nauka, 446 p.
- 2. Biderman V. L. (1977). Mechanics of the thin-walled constructions. Moscow: Mashi nostroenie, 488 p.
- 3. Brajson Ho Yu-shy. (1972). Applied theory of optimal management. Moscow: Mir, 544 p.
- 4. Golushko S. K., Nemirovsky Yu. V. (2008). *Di rect and reverse tasks of mechanics of resilient composite plastins and shells of rotation*. Moscow: Fizmatlit, 432 p.
- 5. Grebenyuk S. N. (2011). Resilient descriptions of composite material with a transtropna matrix and fibre. *Memods of decision of the applied tasks of mechanics of the deformed solid: col. of sci. art.* Dnepropetrovsk: Lira. Iss. 12, 62–68.
- Grebenyuk S. N. (2012). Determination of the maximum module of resiliency on the basis of power condition of concordance. *Bull. Kherson NTU*, Iss. 2(45), 106–112.
- Grebenyuk S. N., Klimenko M. I. (2014). Determination of the effective module of resiliency of composite at normal distribution of the modules of resiliency of fibre and matrix. *Bull. Kherson NTU*, Iss. 3(50), 254–258.
- 8. Dzyuba A. P. (1999). A method of the successive approximations untiing of tasks of optimal management is with limit phase coordinates for optimization of power elements of constructions. *Problems of computational mechanics and strength of syruc-tures*. Dnepropetrovsk: Navchalyna kniga. Iss. 5, 61–85.
- 9. Dzyuba A. P., Sirenko V. N., Dzyuba P. A., Safronova I. A. (2018). Models and algorithms of optimization of elements of heterogeneous shell constructions. *Actual problems of mechanics: monograph. Und. ed. N. V. Poljakov.* Dnipro: Lira, 452 p.
- Mechanics of compos: monograph in 12 vol. Und. the ed. A. N. Guzja. Kiev: Naukova Dumka, 1993–2003 rr. Vol. 8. Statics of elements of constructions. Und. the ed. Ja. M. Grigorenko. 1999. 379 p.
- 11. Obrazstov I. F., Vasilyev V. V., Bunakov V. A. (1977). *Optimal re-enforcement of shells of rotation from composition materials*. Moscow: Mashinostroenie, 144 p.
- 12. Pobedrya B. E. (1984). Mechanics of composition materials: Monograph. Moscow: Nauka, 400 p.
- 13. Solomonov Yu. S., Georgievsky V. P., Nedbay A. Ya., Andryushin V. A. (2013). *Applied tasks of mechanics of composite cylindrical shells*. Moscow: Fizmatlit, 406 p.
- 14. Uitni D. M. (1967). Resilient properties of the shells reinforced by fibres. *Misselry and cosmonautics*. No. 5, 170-173.
- 15. Hashin Z., Rozen B. (1964). Resilient modules of the materials reinforced by fibres. *Appl. mech.* (Trans ASME), No. 2, 71–82.
- 16. Hill R. (1966). Theory of mechanical properties of fibred composite materials. *Mechanics IL*, No. 2, 131–149.
- 17. Shvabyuk D. I., Rotko C. V. (2015). *Linear deformation, durability and firmness of composite shells of middle thickness*: Monograph. Lutsk: LNTU, 254 p.
- 18. Grebenyuk S. N. (2014). The shear modules of composite material with isotropic matrix and a fibre. *J. Appl. Math. and Mech.*, **78**, No. 2, 270–276.

Received 10.10.2019
A. P. Dzyuba^{1,2}, Professor of the Department of Theoretical and Computer Mechanics, Dr. Sci. in Tech., Principal Researcher, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Honored Educator of Ukraine, awarded with medals: «For services to the city of Dnipro», «For Merit» of Yuzhnoye state design office, «For Merit» of the Institute of Technical Mechanics NAS of Ukraine and SSA of Ukraine, «Academician Volodymyr Mossakovsky», the Golden medal «For Achievements» of the Ukrainian Academy of Social Progress and Creativity, awarded with the order «For the Support of Science» ICF «Alfred Nobel Planet» and other rewards. E-mail: dzb@ ua.fm

*V. N. Sirenko*², Deputy Chief Designer of Rocket & Space Launch Systems System Engineering – Head of Ballistics, Aerodynamics & Heat/Mass Transfer, Ph. Dr. in Tech., the Laureate of State Awards in Science and Technique of Ukraine, Honored Worker of industry of Ukraine, Acad. of IAA.

E-mail: V.N.SIRENKO@i.ua

*D. V. Klymenko*², Head of the Division of Strength, Loads, and Dynamic Gharacteristics, Ph. Dr. in Tech., the Laureate of State Award in Science and Technique of Ukraine

E-mail: KLYMENKO_DV@hotmail.com

*L. D. Levytina*¹, Head of Training Laboratory for Computational Mechanics and Strength of Structures, awarded with medals «Academician Volodymyr Mossakovsky», «For Faithful Service to DNU» and others. E-mail: LDLora@i.ua

D. A. Cherenkov², Engineer of the Division of Strength, Loads, and Dynamic Characteristics

E-mail: cherenkovd@gmail.com

¹Oles Gonchar Dnipro National University

72 Gagarina Ave., Dnipro, 49010 Ukraine

²Yuzhnoye State Design Office

3 Kryvorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

OPTIMIZATION OF COMPOSITE REVOLUTION SHELL BY METHODS OF THEORY OF THE OPTIMAL PROCESSES

We considered the problem of weight optimization of parameters of multi-layer composite shell produced by the method of continuous cross-winding under axisymmetric loading. Shell layers are placed symmetrically relative to the middle surface. The angles of the reinforcing material winding variable along the meridian and the thickness of layers are taken as the variation parameters. We propose an algorithm of the automated determination of the elastic constants of a composite material variable along the shell meridian anisotropy. The connection of the composite structure with the technological process of shell manufacturing by winding with a reinforcing tape under different angles to the axis of rotation is taken into account. The values of four elastic constants obtained as a result of experimental testing of witness specimens of the composite material along and orthogonal to the reinforcement are used as output. The equations of state of the moment theory of shells of the variable along the meridian orthotropy and wall thickness are obtained as a boundary value problem for a system of ordinary differential equations with variable coefficients. The use of the necessary optimality conditions in the form of the principle maximum of Pontryagin in the presence of arbitrary phrasal restraints made it possible to reduce the emerging multiparameter problem to a sequence of extremal problems of a significantly smaller dimension. This approach greatly simplifies taking into account the conditions of strength reliability, and technological and structural requirements of real design, and the process of finding an optimal project as a whole. The results of the optimization of a two-layer fiberglass shell of rotation are presented in the form of a change in the distribution of layers' thickness and the glass fiber winding angle. Materials of research can be used to reduce the material consumption of structural elements in rocket and space technology and other branches.

Keywords: composite revolution shell, angles of winding, thickness of layers, medalling of mechanical characteristics, weight optimization, principle maximum of Pontryagin.

Дослідження Землі з космосу

Study of the Earth from Space

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.038
УДК 504.064.3: 528.854: 581.5
О. Д. ФЕДОРОВСЬКИЙ ¹, зав. відділу системного аналізу, д-р фіз.-мат. наук, проф., чл.-кор. НАН України
Л. М. ЗУБ ², зав. лаб. охорони та відтворення біорізноманіття, старш. наук. співроб., канд. біол. наук
Т. М. ДЬЯЧЕНКО ³, старш. наук. співроб., канд. біол. наук
О. В. ТОМЧЕНКО ¹, наук. співроб., канд. техн. наук
Е-mail: tomch@i.ua
А. В. ХИЖНЯК ¹, паук. співроб., канд. техн. наук
В. Г. ЯКИМЧУК ¹, голов. наук. співроб., д-р техн. наук
¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН Національної академії наук України»
вул. Олеся Гончара 55-б, Київ,Україна, 01054
² Інститут еволюційної екології Національної академії наук України

вул. Академіка Лебедєва 37, Київ, Україна, 03143

³ Інститут гідробіології Національної академії наук України

просп. Героїв Сталінграду 12, Київ, Україна, 02000

ДИСТАНЦІЙНЕ ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ВОДОЙМ НА ОСНОВІ БАГАТОВИМІРНОЇ ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ ПЛОЩ БІОТОПІВ НА ПРИКЛАДІ КИЇВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Розглядається метод багатовимірної щільності розподілу площ біотопів мілководних ландшафтів як різновид дистанційного оцінювання стану водних екосистем. В основу розробленого методу поставлено комплексування матеріалів дистанційного зондування Землі і наземних значень екологічного індексу якості води, що забезпечує отримання достатньої кількості даних. Поєднання відомих методів прагматичної оцінки якості води із підходами дешифрування космічних знімків дозволило розробити метод оцінювання екологічного стану водойм на основі багатовимірної щільності розподілу площ біотопів. Це досягається порівнянням площ різних типів біотопів, дешифрованих на космічних знімках того року, для якого відомі значення екологічного індексу якості води, з площами аналізованих біотопів тієї ж водної екосистеми на знімках попередніх років шляхом визначення міри порівняння (багатовимірної щільності розподілу площ порсторових одиниць). Виділені за результатами дешифрування космічних знімків ландшафтні комплекси слугують інтегральним інформативним показником стану як гідроекосистеми, так і водозбірних територій, що значно спрощує і здешевлює роботи з наукових узагальнень та екологічного моніторингу. Площі аквальних ландшафтних комплексів шляхом обчислення міри порівняння трансформовано в екологічний індекс — показник екологічного стану екосистеми.

Ключові слова: екологічний індекс, аквально-ландшафтні комплекси, щільність розподілу площ біотопів, космічні знімки.

вступ

Екологічні показники є основним інструментом для проведення оцінки стану навколишнього середовища. Показники, що базуються на достатніх часових рядах даних, можуть не тільки відображати основні тенденції, але й сприяти аналізу причин та наслідків явищ та змін, що відбуваються в екосистемі.

Основою контролю якості середовища (екологічного стану) традиційно були фізико-хіміч-

Цитування: Федоровський О. Д., Зуб Л. М., Дьяченко Т. М., Томченко О. В., Хижняк А. В., Якимчук В. Г. Дистанційне оцінювання екологічного стану водойм на основі багатомірної щільності розподілу площ біотопів на прикладі Київського водосховища. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 38—47. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.038 ні методи, що передбачають визначення низки показників: температури, прозорості води, концентрації завислих речовин, іонного складу, мінералізації, концентрації біогенних елементів, розчиненого у воді кисню, різноманітних токсикантів, показника рН тощо. Такі контрольовані показники складу і властивостей водного середовища дають формалізовану оцінку як якості гідроекосистеми, так і її відповідності чинним прагматичним нормативам якості води (питного водоспоживання, рибництва чи рекреації). Вони дозволяють оцінити перспективи та загрози порушення функцій відтворення основних біотичних компонентів екосистем водойми. Сьогодні більш вживаними стають біологічні методи оцінки екологічного стану водойми [7, 8], проте головним їхнім недоліком є потреба у багаторазових польових дослідженнях. Натурні гідробіологічні дослідження самі по собі є складними та затратними, особливо коли йдеться про мілководні комплекси, що мають значні площі чи є важкодоступними. Саме тому для організації наукових досліджень, системного контролю і оцінки впливу природних і антропогенних чинників на екологічний стан водних об'єктів найефективніше використовувати дистанційні аерокосмічні методи. Це дозволить оперативно одержувати інформацію про просторову структуру аквальних ландшафтів, можливу їхню перебудову, і, відповідно, про зміни стану гідроекосистем, що суттєво здешевить дослідження у випадку великих площ акваторій [10].

Мілководні ділянки водойм та водотоків є складовою специфічних ландшафтних комплексів, які слугують оселищами низки видів водних та прибережноводних рослин. Саме сукупності цих рослин (угруповання чи їхні поєднання), зв'язані однотипними умовами місцеперебування, маркують певні просторові структурні одиниці (типи біотопів [5] чи аквально-ландшафтні комплекси [3, 4, 12] і належать до важливих інформативних показників гідроекосистем. Саме мілководні біотопи першими реагують на будь-які зміни в гідроекосистемі, зокрема на антропогенне забруднення, і є потужними біологічними фільтрами, тому контроль за їхнім станом дозволяє не тільки оцінювати екологічну ситуацію, але і прогнозувати її розвиток [1]. Структура мілководних біотопів є інтегральним інформативним показником стану як гідроекосистеми, так і водозбірних територій. За рахунок рослинних угруповань, що розвиваються тут і добре дешифруються на космічних знімках, дані щодо розподілу зарослих площ тих чи інших фітоценозів можуть бути використані для узагальнення інформації про стан екосистеми. Аналіз ретроспективних рядів космічних знімків дозоляє проаналізувати як кількісні показники просторових структурних одиниць водного об'єкту (зокрема площі зарослих мілководь), так і якісні (структуру угруповань), спрогнозувати хід сукцесійних процесів, оцінити ресурсний потенціал гідроекосистем та виявити можливі загрози як біорізноманіттю, так і якості води.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В основі використаних методик лежить методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями [9].

Визначення об'єднаної оцінки якості води для певного водного об'єкта в цілому або для окремих його ділянок полягає в обчисленні інтегрального або екологічного індексу (EI). Значення екологічного індексу І_F якості води визначається як середнє трьох факторних індексів:

$$I_E = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} , \qquad (1)$$

де I_1 — індекс забруднення компонентами сольового складу, I_2 — індекс трофо-сапробіологічних (еколого-санітарних) показників, І₃ — індекс специфічних показників токсичної і радіаційної дії.

Факторний індекс Іф визначено за відношенням усереднених значень однієї з характеристик у кожній групі (табл. 1) до їхніх регламентованих величин:

$$I_{\phi} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} N_i},\tag{2}$$

де N_i — номер категорії. Ця методика потребує достатньо широкого набору показників, які не завжди є повними для певного ретроспективного ряду років, що значно ускладнює і підвищує вартість робіт, а також дає лише вже згадану прагматичну оцінку якості води, обмежуючи можливість оцінки якості екосистеми загалом та ведення екологічного моніторингу. Використання матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) спрощує і підвищує оперативність оцінювання екологічного стану гідроекосистеми.

В основу розробленого нами методу поставлено комплексування матеріалів ДЗЗ і наземних значень EI якості води, що забезпечує отримання достатньої кількості даних [13]. На першому етапі формують базу даних щодо конкретної водної екосистеми: площі біотопів чи їхніх типів визначаються по космічному знімку. За ті ж роки для цих же об'єктів одержують значення ЕІ [9]. На другому етапі виконують оперативне дистанційне оцінювання екологічного стану водних екосистем по космічних знімках, що відповідають даті аналізу. Кожен тип біотопу можна деталізувати залежно від гідрологічних особливостей водного об'єкту та просторової розрізненності космічних знімків, що використовуються у роботі. На наступному етапі для досліджуваної водної екосистеми здійснюють ідентифікацію її стану за значенням ЕІ та площ біотопів, отриманих в ході дешифрування космічних знімків.

Це досягається порівнянням площ різних типів біотопів на космічних знімках поточно-

го року з площами аналізованих біотопів тієї ж водної екосистеми на знімках попередніх років шляхом визначення міри порівняння (МП) аналізованих площ з площами попередніх років.

Міра порівняння — це багатовимірна щільність розподілу площ, яка має максимальне значення при однакових площах і зменшується у міру збільшення різниці площ [2, 14]. Потім вибирають рік з найбільшим значенням МП, тобто з найближчими площами окремих типів біотопів досліджуваного і вибраного року, що є підставою вважати їхні екологічні індекси якості води найбільш близькими.

Послідовність операцій, що реалізують пропонований метод.

1. Підбирається ряд безхмарних придатних для дешифрування багатоспектральних космічних знімків високої та середньої просторової розрізненності попередніх років у період максимального вегетаційного розвитку рослинності.

2. Дешифруються космічні зображення водної екосистеми попередніх років, виділяються певні просторові структурні одиниці (типи біотопів, типи ландшафтів, типи рослинних угруповань тощо) і обчислюються їхні площі.

3. Для водної екосистеми протягом ряду попередніх років обчислюється екологічний індекс якості води за формулою (1).

I ₁	I ₂	I ₃
Індекс забруднення	Індекс трофно-сапробілогічних показників	Індекс специфічних показників
компонентами сольового складу	(еколого-санітарний)	токсичної дії
– сума іонів, мг/дм ³ – хлориди, мг/дм ³ – сульфати, мг/дм ³	 - pH завислі речовини, мг/дм³ - розчинений кисень, мгО₂/дм³ - доля насичення води киснем, % - перманганатна окиснюваність, мгО/л - біохромна окиснюваність, мгО/л - біохімічне споживання кисню (БСК5), мгО₂/дм³ - азот амонійний, мгN/дм³ - азот нітратний, мгN/дм³ - азот нітритний, мгN/дм³ - фосфор фосфатний, мгР/дм³ 	 нафтопродукти феноли (леткі) цинк ціаніди фториди мідь поверхнево-активні речовини (ПАР) хром (загальний) залізо (загальне) марганець (загальний) свинець

Таблиця 1. Показники, використані для розрахунку факторних індексів

4. Для досліджуваної водної екосистеми у поточному році підбираються *N* безхмарних багатоспектральних космічних знімків високої та середньої просторової розрізненності у період максимального вегетаційного розвитку рослинності.

5. Дешифруються *N* космічних зображень досліджуваної водної екосистеми поточного року, виділяються просторові структурні одиниці і обчислюються їхні площі.

На наступному етапі для вибраної водної екосистеми здійснюють ідентифікацію її стану порівнянням значень площ різних типів біотопів, отриманих в ході дешифрування на космічних знімках поточного року, зі значенням площ тих же типів біотопів тієї ж екосистеми на знімках попередніх років шляхом визначення міри порівняння. За максимальним значенням міри порівняння визначають рік, в якому площі типів біотопів найменше відрізняються, тобто рік, найбільш близький екологічному стану досліджуваного року.

6. Виконані у п. 5 N обчислень площ ландшафтних комплексів досліджуваної водної екосистеми, представляють вектор $\mathbf{S}_n = S_{n1}, ..., S_{nk}, ..., S_{nK}$ (n = 1, 2, ..., N), який вважатимемо випадковим. Елементи вектора є випадковими величинами, розподіленими за нормальним законом. Потім визначаються по N замірах середні значення площ ландшафтних комплексів \overline{S}_k і їхні середні квадратичні відхилення σ_k за формулами:

$$\overline{S_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} S_{nk} , \qquad (3)$$

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^{N} (S_{nk} - \overline{S}_{nk})^2}$$
 (4)

7. Площі ландшафтних комплексів попередніх M років розглядаються як вибіркове значення деякого випадкового вектора $\mathbf{R}_m = (R_{m1}, ..., R_{mk}, ..., R_{mK}), m = 1, 2, ..., M, з невідомим$ значенням <math>m, що підлягає визначенню. Це відповідає тому факту, що це площі ландшафтних комплексів m-го року.

Для порівняння досліджуваної площі ландшафтних комплексів S_k з площами ландшафтних комплексів R_m визначаються значення

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

щільності розподілу $p_{mk}(S_k)$:

$$p_{m,k}(S_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k}} \exp\left(-\frac{(R_{mk} - S_k)^2}{2\sigma_k^2}\right).$$
 (5)

8. Порівнюються всі площі S_n ландшафтних комплексів аналізованої водної екосистеми S_n і площі R_m ландшафтних комплексів на знімках попереднього *m*-го року шляхом визначення багатовимірної щільності розподілу $p_m(S)$, яку ми називаємо мірою порівняння:

$$p_m(S) = \prod_{k=1}^{K} p_{mk}(S_k) \cdot \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{K/2} \times \\ \times \prod_{k=1}^{K} \exp\left(-\frac{(R_{mk} - S_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \cdot \frac{1}{\sigma_k},$$
(6)

9. Із одержаних мір порівняння визначається їхнє максимальне значення $p_{m^*}(S)$, яке відповідає року m^* .

10. Вибирається I_E відповідного року m^* , у якому площі ландшафтних комплексів найменше відрізняються від аналізованої водної екосистеми.

11. Екологічний індекс якості води аналізованої водної екосистеми встановлюють рівним ЕІ ділянок *m**-го року, що зумовлено найменшою відмінністю площ ландшафтних комплексів і близьким екологічним станом цих об'єктів.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дистанційне оцінювання екологічного стану водойм на основі багатовимірної щільності розподілу площ біотопів на прикладі Київського водосховища розпочалося з оцінки якості води за матеріалами спостережень Українського гідрометеорологічного центру (УкрГМЦ), наданими Центральною геофізичною обсерваторією МНС України за період від 1989 р. до 2015 р. Використано середньорічні значеннями ряду гідрохімічних показників (CO₂, O₂, N_(заг), NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, P_(заг), PO₄³⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, HCO₃⁻, Cr⁴⁺, Ca⁺, K⁺, Mg⁺, Na⁺, Cu⁺, Fe⁺, нафтопродукти, феноли, ПАР, ДДТ, БСК5, біохромна окиснюваність, рН, прозорість, кольоровість, мінералізація, жорсткість, завислі речовини та ін.). Для аналізу такого значного масиву даних було використано ряд індексів оцінки якості води, що дозволило отримати більш різносторонню й адекватну ха-



Рис. 1. Динаміка змін екологічного індексу якості води верхніх ділянок Київського водосховища

рактеристику, оскільки ці формалізовані показники не лише узагальнюють ширші групи первинних даних, але й враховують різні сторони гідрохімічних та екологічних процесів у водному об'єкті [6].

На основі середньорічних значень ряду гідрохімічних показників якості води Київського водосховища з 1989 р. було розраховано загальний інтегральний індекс якості води. Динаміку змін екологічного індексу наведено на рис. 1.

На підставі проведених розрахунків екологічної оцінки якості води верхів'я Київського водосховища [11] можна констатувати:

• за критерієм специфічних речовин токсичної та радіаційної дії якість води водосховища на 2011 р. можна віднести до III класу «задовільна», «слабо забруднена»; при цьому спостерігається тенденція до покращення, значення індексу змінюється від 3.7 до 2.5;

• за еколого-санітарним блоком стан водосховища можна оцінити II класом якості «добрі, досить чисті води»;

• значення інтегрального ЕІ лежить у межах від 2.3 до 3.1, що дає підставу віднести водойму до II класу якості води. Вода за якістю оцінюється як «добра» за станом, «досить чиста» за ступенем чистоти.

Матеріали тематичного дешифрування 14 космічних знімків за період з 1989 по 2015 рр. (загальною площею 10285 км²) та дані польових досліджень 2012—2013 рр. у межах тестових полігонів дозволили класифікувати основні типи біотопів Київського водосховища [5]. На багатоспектральних космічних знімках середньої просторової розрізненності («Ландсат») використовувався алгоритм піксельно-орієнтованої класифікації методом штучних нейронних мереж. Використано модель нейронної мережі — багатошаровий перцептрон, — в якій вхідними ознаками були значення спектральних каналів, а також показники нормалізованого вегетаційного (NDVI) та нормалізованого водного (NWI) індексів. За дешифрувальні ознаки застосовано спектральні характеристики відбивальних поверхонь виділених класів, які були отримані на основі еталонних ділянок, завірених у ході польового дешифрування, та ідентифікувалися експертом як класи.

Було класифіковано шість типів біотопів (рис. 1).

• I. Біотопи заплавних листяних лісів — прируслові дерев'янисто-чагарникові ценози, що склалися в умовах надмірного зволоження як на молодих супіщаних і піщано-мулистих наносах, так і на лучно-болотних ґрунтах (рис. 2, *a*).

• II. Біотопи штучних хвойних насаджень — штучні насадження сосни на супіщаних і дерново-підзолистих ґрунтах островів і прируслових гряд (рис. 2, б).

• III. Біотопи заплавних луків — ксеро-мезофільні і гігро-мезофільні злаково-різнотравні і осокові луки, що формуються в широкому діапазоні ґрунтових умов (рис. 2, в).

• IV. Прибережні перезволожені біотопи — зона підтоплення і прибережний пояс річкових русел, літораль заплавних водойм різного типу і плеса водосховища, зайняті угрупуваннями з домінуванням високотравних гелофітів на піщано-мулистих, мулистих і торф'янистих ґрунтах (рис. 2, *г*).

• V. Оселища вищих гідрофітів (біотопи фіталі) — мілководні акваторії річкових русел і водосховищ, а також різноманітних заплавних водойм (глибиною до 2.5 м), що заростають угрупуваннями гідрофітів (з плаваючим листям та занурених) на піщаних, мулисто-піщаних і мулистих грунтах (рис. 2, *д*).

• VI. *Незарослі гідротопи водосховища* — глибоководні акваторії річкових русел і водосховища з глибинами понад 2.5 м, здебільшого позбавлені заростей вищих водних рослин (рис. 2, *e*).

У результаті дешифрування космознімків з КА «Ландсат-5, 7, 8» отримано карти розподілу



Рис. 2. Ландшафтні комплекси мілководь Київського водосховища, що дешифруються на космічних знімках: *a* — біотопи заплавних листяних лісів (51°8'42.78" N, 30°33'48.02" E), *б* — біотопи штучних хвойних насаджень (51°10'31.97" N, 30°34'5.06" E), *в* — біотопи заплавних луків (51°9'18.52" N, 30°33'54.43" E), *е* — перезволожені біотопи (51°10'46.036" N, 30°32'50.542" E), *д* — оселища вищих гідрофітів (51°9'17.272" N, 30°30'0.199" E), *е* — незарослі гідротопи водосховища (51°4'36.80" N, 30°31'36.69" E)



Рис. 3. Карти розподілу основних типів біотопів верхів'я Київського водосховища, отримані за матеріалами дешифрування КА «Landsat» (типи біотопів: *1* — заплавні листяні ліси, *2* — хвойні ліси, *3* — заплавні луки, *4* — перезволожені біотопи, *5* — біотопи фіталі, *6* — незарослі гідротопи)

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5



Таблиця 2. Екологічна оцінка якості води Київського водосховища та динаміка площ біотопів, виділених за матеріалами ДЗЗ

	Типи біотопів, площа (га)					Індексні показники				
Роки	біотопи заплавних листяних лісів	біотопи штучних хвойних насаджень	біотопи заплавних луків	прибережні перезволожені біотопи	біотопи фіталі	незарослі гідротопи водо- сховища	<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	I ₃	I _{заг}
1989	7921.8	3993.4	7334.3	8537.0	5588.9	27093.5	1.333	2.55	4.000	2.63
1991	8153.5	4040.8	7157.0	8815.7	7491.3	24810.6	1.333	2.45	3.130	2.3
1993	7298.3	4235.3	7242.2	9008.9	7665.9	25018.4	1.333	3.18	5.000	3.17
1995	7498.9	4448.3	7437.3	9485.1	7850.2	23749.1	1.333	3.45	4.000	2.93
1997	7030.5	4254.5	8143.9	8960.1	6218.4	25861.6	1.333	3.36	3.500	2.73
1999	7985.2	4632.2	6939.6	10353.2	8989.2	21569.7	1.333	3.55	3.380	2.75
2001	8103.3	4599.8	6685.1	11370.0	8809.2	20901.5	1.333	3.64	4.130	3.03
2003	7171.7	4609.6	5619.2	12639.1	9832.7	20596.5	1.333	3.73	2.750	2.6
2005	7756.9	4569.7	4422.9	13432.8	9539.9	20745.1	1.000	3.45	2.380	2.28
2007	8753.5	4585.4	4355.0	13223.9	8764.1	20787.1	1.333	3.55	2.630	2.5
2009	7367.7	4557.7	5420.8	12858.9	9013.4	21250.5	1.000	3.73	3.380	2.7
2011	8224.7	4528.7	4524.5	13716.5	9866.8	19607.8	1.333	3.36	3.250	2.65
2013	9016.3	4577.1	3829.3	14011.9	10317.2	18717.2	1.000	3.36	2.880	2.41
2015	9252.5	4662.5	4346.8	14198.2	10428.2	17580.3	1.000	3.18	2.625	2.38

та площі основних типів біотопів за період з 1989 по 2015 роки через кожні два роки (рис. 3, табл. 2).

Графік значень коефіцієнта кореляції між площами біотопів і екологічним індексом (рис. 4) демонструє, що незарослі гідротопи водосховища та біотопи заплавних луків мають додатний коефіцієнт кореляції, тобто зі збільшенням площ цих біотопів зростає екологічний індекс. А біотопи фіталі, прибережні перезволожені та заплавних листяних лісів мають від'ємний коефіцієнт кореляції, тобто зі збільшенням площ цих біотопів зменшується екологічний індекс. Також видно, що біотопи штучних хвойних насаджень майже не впливають на екологічний індекс. За формулами (1)-(4) визначено EI якості води аналізованої водної екосистеми для кожного року (табл. 2). Похибку розрахунків екологічного індексу для всіх років наведено на рис. 5.

ВИСНОВКИ

Використання матеріалів дистанційного зондування Землі спрощує і підвищує оперативність оцінювання екологічного стану гідроекосистеми. Поєднання відомих методів прагматичної оцінки якості води із підходами дешифрування космічних знімків дозволило розробити метод оцінювання екологічного стану водойм на основі багатовимірної щільності розподілу площ біотопів. В основу розробленого методу поставлено комплексування матеріалів дистанційного зондування Землі і наземних значень екологічного індексу якості води, що забезпечує отримання достатньої кількості даних. Це досягається порівнянням площ різних типів біотопів, дешифрованих на космічних знімках того року, для якого відомі значення екологічного індексу якості води з площами аналізованих біотопів тієї ж водної екосистеми на знімках попередніх років шляхом визначення міри порівняння (багатовимірної щільності розподілу площ просторових одиниць). За максимальним значенням міри порівнянь визначають рік найбільш близьких значень екологічного індексу якості води. Похибка розрахунків екологічного індексу може бути зменшена при збільшенні періоду збору матеріалів дистанційного зондування Землі і наземних значень екологічного індексу якості води.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Гейны С., Дубына Д. В., Сытник К. М. и др. *Макрофиты индикаторы изменений природной среды*. Киев: Наук. думка, 1993. 433 с.
- 2. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. Учебник. Изд. 6-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1988. 448 с.
- Дьяченко Т. М. Внутрішньо-ландшафтне районування водних об'єктів Кілійської дельти Дунаю. Ландшафт як інтегруюча концепція XXI ст.: зб. наук. праць укр. географ. Тов., укр. асом. Ландш. Екол., Київ. нац. ун-ту. 1999. С. 308—310.
- 4. Дьяченко Т. Н., Томченко О. В. Изучение динамики зарастания водных объектов Килийской дельты Дуная на основании материалов космической сьемки. *Гидробиол. журн.* 2018. **54**, № 6. С. 35–46.
- 5. Зуб Л. М., Томченко О. В. Оценка трансформации водно-болотных угодий с использованием космической информации ДЗЗ (на примере верховий Киевского водохранилища). *Гидробиол. журн.* 2015. **51**, № 6 (306). С. 29—40.
- 6. Зуб Л. М., Томченко О. В. Формування рослинного покриву та деякі особливості гідрохімічного режиму Київського водосховища. *Екологічні науки*. 2015. № 8. С. 27—39.
- 7. Патент України № 89288. Афанасьєв С. О., Цибульський О. І., Усов О. Є., Шевцова Л. В. Спосіб визначення екологічного стану водойм. Опубл. 11.01.2010. Бюл. № 1.
- 8. Патент України № 97900. Карпова Г. О. Спосіб визначення трофічного статусу водойм. Опубл. 26.03.2012. Бюл. № 6.
- 9. Романенко В. Д., Жукинський В. М., Оксіюк О. П. та ін. *Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями*. СИМВОЛ-Т, 1998.
- 10. Спосіб дистанційної оцінки екологічного стану і якості води внутрішніх водойм. *Перспективні науково-технічні розробки НАН України*. 2017. Вип. «Екологія та охорона довкілля». С. 32.
- 11. Томченко О. В., Зуб Л. М, Сагайдак А. В. Оцінка екологічного стану акваторій водно-болотних угідь верхніх ділянок Київського водосховища. *Екологія водно-болотних угідь і торфовищ*: зб. наук. ст. Голов. ред. В. В. Коніщук. Київ: ТОВ«НВП«Інтерсервіс», 2014. С. 246—251.

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

- 12. Федоровский А. Д., Даргейко Л. Ф., Дьяченко Т. Н. К вопросу оценки экологического состояния шквально-наземных ландшафтних комплексов на основе системного похода. *Доп. НАН України*. 2000. № 5. С. 129—131.
- 13. Федоровський О. Д., Хижняк А. В., Томченко О. В., Зуб Л. М., Підгородецька Л. В., Дьяченко Т. М., Шевченко А. М., Власова О. В., Ходоровський А. Я. Мультидисциплінарний аналіз аерокосмічної і наземної інформації при оцінці стану водних екосистем на основі методів системного аналізу. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі.* 2015. № 7. С. 27—42.
- 14. Arkhipov A. I., Glazunov N. M., Khyzhniak À. V. Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis.* 2018. **54**, N 1. P. 94–98.

Стаття надійшла до редакції 14.11.2019

REFERENCES

- 1. Gejny S., Dubyna D. V., Sytnik K. M. i dr. (1993). *Macrophytes indicators of environmental changes*. Kiev: Naukova dumka, 433 p. [in Russian].
- 2. Gnedenko B. V. (1988). *Probability Theory Course*, Uchebnik, Izd. 6-e, pererab. i dop, M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 448 p. [in Russian].
- 3. D'iachenko T. M. (1999). Inland landscape zoning of the Danube basin. Landshaft iak intehruiucha kontseptsiia XXI st., Zbirn. Nauk. prats' ukr. heohraf. Tov., ukr. asom. Landsh. Ekol., Kyivs'koho nats. un-tu., 308–310 [in Ukrainian].
- 4. D'jachenko T. N., Tomchenko O. V. (2018). Analysis of Vegetation Dynamics of Water Bodies of the Kiliya Danube Delta on the Basis of Remote Earth Probing. *Gidrobiologicheskij zhurnal*, **54**, № 6, 35–46 [in Russian].
- 5. Zub L. M., Tomchenko O. V. (2015). Assessment of the WetInds Transformation using the Satellite Information of Remote Earth Probing (by Example of Upper Section of the Kyiv Reservoir). *Gidrobiologicheskij zhurnal*, **51**, № 6 (306), 29–40 [in Russian].
- 6. Zub L. M., Tomchenko O. V. (2015). Formation of vegetation cover and some features of the hydrochemical regime of the Kiev reservoir. *Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyj zhurnal*. Holovnyj redaktor O. I. Bondar, K.: DEA, № 8, 27–39 [in Ukrainian].
- 7. Patent Ukrainy № 89288. Afanas'iev S. O., Tsybul's'kyj O. I., Usov O. Ye., Shevtsova L. V. A method of determining the ecological status of reservoirs. Opubl. 11.01.2010, Biul. № 1 [in Ukrainian].
- 8. Patent Ukrainy № 97900. Karpova H. O. The method of determining the trophic status of reservoirs. Opubl. 26.03.2012, Biul. № 6 [in Ukrainian].
- 9. Romanenko V. D., Zhukyns'kyj V. M., Oksiiuk O. P. ta in. (1998). *Methodology of ecological assessment of surface water quality by relevant categories.* SYMVOL-T [in Ukrainian].
- 10. Method for remote assessment of environmental status and water quality of inland water bodies. (2017). Dovidkove vydannia "Perspektyvni naukovo-tekhnichni rozrobky NAN Ukrainy", Vypusk "Ekolohiia ta okhorona dovkillia", Kyiv: Akademperiodyka, 32 [in Ukrainian].
- Tomchenko O. V., Zub L. M, Sahajdak A. V. (2014). Assessment of ecological status of wetlands of the upper sections of the Kiev reservoir. Ekolohiia vodno-bolotnykh uhid' i torfovysch (zbirnyk naukovykh statej). Holovnyj redaktor V. V. Konischuk. Kyiv: TOV «NVP«Interservis», 246—251 [in Ukrainian].
- 12. Fedorovskij A. D., Dargejko L. F., D'jachenko T. N. (2000). On the issue of assessing the ecological state of squally-terrestrial landscape complexes based on a systematic approach. *Dop. NAN Ukraïni*, № 5, 129–131 [in Russian].
- 13. Fedorovs'kyj O. D., Khyzhniak A. V., Tomchenko O. V., Zub L. M., Pidhorodets'ka L. V., D'iachenko T. M., Shevchenko A. M., Vlasova O. V., Khodorovs'kyj A. Ya. (2015). The multidisciplinary analysis of the aerospace and ground information while assessing the status of water ecosystems based on the methods of system analysis. *Ukrains'kyj zhurnal dystantsijnoho zonduvannia Zemli*, № 7, 27–42 [in Ukrainian].
- 14. Arkhipov A. I., Glazunov N. M., Khyzhniak À. V. (2018). Heuristic Criterion for Class Recognition by Spectral Brightness. *Cybernetics and Systems Analysis*, **54**, № 1, 94–98.

Received 14.11.2019

A. D. Fedorovsky¹, Head of System Analysis Department, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor, Corresponding Member of NAS of Ukraine
L. N. Zub², Head of Biodiversity Conservation and Reproduction Laboratory, Senoir Researcher, Cand. Sci. in Biology
T. N. Dyachenko³, Senoir Researcher, Cand. Sci. in Biology
O. V. Tomchenko¹, Researcher, Cand. Sci. in Tech.
E-mail: tomch@i.ua
A. V. Khyzhniak¹, Researcher, Cand. Sci. in Tech.
V. H. Yakymchuk¹, Chief Researcher, Dr. Sci. in Tech.
¹ Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth IGN NAS Ukraine
⁵⁵-b Olesia Honchara Str., Kyiv, 01054 Ukraine
² Institute for evolutionary ecology NAS of Ukraine
37 Akademika Lebedeva Str., Kyiv, 03143 Ukraine

³ Institute of Hydrobiology NAS of Ukraine

12 Heroiv Stalingrada ave., Kyiv, 02000 Ukraine

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

The article discusses the method of the multidimensional density distribution of biotopes' areas of shallow landscapes as a kind of remote estimation of the status of aquatic ecosystems. The developed method is based on the combination of Earth remote sensing data and in-situ measurements of the ecological water quality index to provide sufficient data. The combination of existing methods of water quality assessment with approaches to decoding space images made it possible to develop a method for assessing the ecological status of reservoirs based on the multidimensional density of biotopes. This is achieved by comparing the areas of different types of biotopes decoded on the space images of that year for which the values of the ecological water quality index are known with the areas of the analyzed biotopes of the same aquatic ecosystem in the images of previous years by determining the measure of comparison (the multidimensional density of space units distribution). Landscape complexes identified by decoding of the space images serve as an integral informative indicator of the condition of both the hydro-ecosystem and the water collection areas, which greatly simplifies and reduces the cost of work on scientific generalizations and environmental monitoring. The areas of the aquatic landscape complexes have been transformed into an ecological index by computing the measure of comparison — an indicator of the ecological condition of the ecological index by computing the

Keywords: ecological index, aquatic-landscape complexes, density distribution of biotope areas, satellite images.

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.048 УДК 551.24 (4/5)

В. В. ПОКАЛЮК¹, пров. наук. співроб., д-р геол. наук

E-mail: pvskan@ukr.net

I. Е. ЛОМАКІН², зав. відділу тектоніки і морської геоекології, д-р геол. наук

В. Г. ВЕРХОВЦЕВ¹, зав. відділу спеціальної металогенії, д-р геол. наук

¹ Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України» Пр-т Академіка Палладіна 34а, Київ-142, 03142

² Державна установа «Центр проблем морської геології, геоекології і осадового рудоутворення

Національної академії наук України»

вул. Олеся Гончара 55б, Київ-601, Україна, 01601

БАЛТІЙСЬКО-ІРАНСЬКИЙ СУПЕРЛІНЕАМЕНТ— ДОВГОЖИВУЧИЙ ТРАНСЄВРАЗІЙСЬКИЙ ПОЯС ДИСЛОКАЦІЙ І ПЛАНЕТАРНОЇ МЕГАТРІЩИНУВАТОСТІ

На основі аналізу літературних геолого-геофізичних, картографічних, космографічних матеріалів, включаючи результати тектонолінеаментного дешифрування космозображень земної поверхні, узагальнено відомості щодо розломної тектоніки і глибинної будови глобального трансєвразійського поясу дислокацій та планетарної мегатріщинуватості — Балтійсько-Іранського суперлінеаменту; уточнено особливості його поширення і сегментації. Суперлінеамент є найбільшою трансєвразійською структурою планетарного рангу — невід'ємною складовою частиною закономірно просторово орієнтованого стародавнього регматичного розломного каркасу Євразії, утвореного на ранніх етапах формування жорсткої земної кори під впливом глобальних напружень, пов'язаних з фактором ротації Землі. Довгоживучий характер поясу (верхній протерозой — кайнозой) і його квазістаціонарне положення протягом всієї історії формування, а також відсутність масштабних в кілька сотень кілометрів зсувних переміщень уздовж нього і у вузлах перетину з поперечними тектонолінеаментними поясами близького рангу, вказують на малоймовірність мобілістської моделі сходження Афро-Аравії і Євразії. Більш вірогідною є модель деструкції колись єдиного Афро-Євразійського континенту у потенційно зсувному полі відносно малоамплітудних (в планетарному масштабі) дислокацій. Геодинамічний режим формування і розвитку поясу в цілому не можна описати будь-яким одним типом — рифтогенним чи колізійним. У ньому періодично чергуються регіональні і надрегіональні зони розтягування (рифтогенні) та стиснення (колізійні). В цьому проявляється глобальність поясу, об'єднання/сполучення в ньому різних геодинамічних режимів, а також хвильовий характер та ісрархічність тектонічного процесу.

Ключові слова: космічне дешифрування, тектоніка, геодинаміка, лінеамент, Балтійсько-Іранський тектонолінеаментний пояс, зона Тейсейра — Торнквіста, регматична розломна мережа, планетарна мегатріщинуватість.

вступ

У публікації розглядається Балтійсько-Іранський (БІ) суперлінеамент/тектонолінеаментний пояс, який в цілому відповідає лінеаменту, виділеному під цією назвою Л. М. Расцветаєвим [25, 26], а раніше під схожою назвою — Г. Штілле [45]. Відомі й інші найменування поясу — Ельбсько-Загроський лінеамент за В. А. Бушем [4—6] і Північноморсько-Аравійська система розломів за А. В. Горячевим [10]. Такі розломні зони

Цитування: Покалюк В. В., Ломакін І. Е., Верховцев В. Г. Балтійсько-Іранський суперлінеамент — довгоживучий трансєвразійський пояс дислокацій і планетарної мегатріщинуватості. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 48—72. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.048

трансконтинентального рангу привертають особливий інтерес в аспекті формування планетарної мережі лінеаментів, зобов'язаною своїм походженням глобальним чинникам, передусім особливостям ротаційного режиму земних оболонок. Ці зони значною мірою контролюють формування і розміщення родовищ більшості корисних копалин, в тому числі вуглеводнів.

Мета публікації — показати єдність і взаємозв'язок загальної структури тектонолінеаментного БІ-поясу у просторі та часі для визначення геодинамічних особливостей його формування протягом тривалої історії розвитку. При цьому вирішувалося завдання більш повного позначення просторового поширення поясу і його головних елементів на основі аналізу геологогеофізичних картографічних матеріалів та тектонолінеаментного дешифрування наявних у вільному доступі даних космічних радарних SRTMзображень земної поверхні. Широкі можливості генералізації космічних оглядових цифрових зображень та удосконалення методів їхньої обробки дає можливість на новому рівні провадити морфоструктурний і тектонолінеаментний аналіз величезних територій.

У зв'язку з тим що даний пояс включає в себе окремі складові елементи Середземноморського рухомого поясу (області Неотетісу) і займає кососічне положення відносно останнього, виходячи далеко за його межі, питання формування БІ-поясу тісно пов'язане з проблемою розвитку всього Середземномор'я (і його платформного оточення) та різними концептуальними геотектонічними підходами в її вирішенні.

Мобілістська модель передбачає сходження Афро-Аравії та Євразії з колізійним закриттям Мезо-Неотетісу. При цьому загальні закономірності будови, просторового розташування і кінематики рухів різних гілок БІ-суперлінеаменту, які спостерігаються по різні боки Середземномор'я, стають наслідком випадкового поєднання різнорідних і незалежних один від одного геоблоків літосфери. Натомість встановлена космічним дешифруванням сувора узгодженість і впорядкованість глибинного тектонічного каркасу Європи і Землі в цілому [1, 15, 51] може бути забезпечена тільки глобальними чинниками загальнопланетарного характеру, пов'язаними тією чи іншою мірою з впливом ротаційного режиму земних оболонок на розподіл напружень в літосфері. Все це визначає **актуальність** даних досліджень для вироблення сучасної мультидисциплінарної концептуальної геотектонічної парадигми, необхідність якої підкреслено В. Є. Хаїним [34].

Теоретичною основою роботи є уявлення про розломно-блокову будову земної кори і тектонічну подільність тектоносфери, традиційні для української геологічної школи В. Г. Бондарчука та І. І. Чебаненка; а також основні положення концепції планетарної мережі лінеаментів, що активно розвивається з початку минулого століття У. Хоббсом, Р. Зондером, Д. Умбгрове, Г. Штілле, Д. Муді, М. Хілом, І. І. Чебаненком, Е. М. Пермяковим, Г. М. Каттерфельдом, Г. В. Чарушиним, А. В. Доліцьким, П. С. Вороновим, С. С. Шульцем, К. Ф. Тяпкіним, А. М. Ласточкіним, В. А. Бушем, Я. Г. Кацем, А. І. Полетаєвим, В. І. Макаровим, Л. М. Расцветаєвим, В. М. Анохіним і багатьма іншими дослідниками. В аспекті даної публікації є сенс привести в короткому цитуванні деякі основні положення цієї концепції, що стосуються проблеми об'єднання різнорідних геотектонічних структур у складі великих лінеаментів планетарного і трансконтинентального рангу, наведені В. А. Бушем [4, С. 27—29]:

• «Крупнейшие тектонические структуры, отраженные на космических снимках в виде линеаментов первого ранга, образующие зоны протяженностью во многие тысячи километров и шириной от первых десятков до 200—300 км, реально существующие геологические образования, подтверждаемые на многих отрезках своего протяжения данными геологического картирования и геофизических зондирований.

• Правомерность объединения однонаправленных, хотя иногда и разобщенных фрагментов линейных структур в единые протяженные зоны подтверждается единством динамики тектонических движений на всем протяжении таких зон, определенным временем заложения и развития и соответствующими постумными движениями. <...> Некоторые линеаменты сохраняют однообразные геодинамические условия на всем своем протяжении. <...>Однако большинство линеаментов меняет геодинамические условия формирования и во времени, и в пространстве.

• Четко прослеживается активизация движений по линеаментам в соответствии с возрастом рассекаемых ими складчатых поясов. <...> Этим часто определяется и изменение динамики движений вдоль простирания линеаментов. <...> При перпендикулярном или диагональном пересечении ими складчатых систем секущие линеаменты часто теряются, прерываются, что вызвано переработкой их более молодыми поверхностными структурами.

• Секущие линеаменты пересекают насквозь основные блоковые структуры земной коры и выходят за их пределы. <...>Линеаменты первого ранга (глобальные) пересекают целиком Евразиатскую плиту, ограничивающую ее систему зон субдукции и коллизии и лежащую южнее и восточнее рифтовую систему зон спрединга (Срединно-Индоокеанскую и Тихоокеанскую). Таким образом, они являются секущими по отношению к литосфере в целом. Трансконтинентальные линеаменты (второго ранга) рассекают почти целиком весь Евразиатский континентальный мегаблок и выходят за его пределы в межконтинентальный Средиземноморский пояс и на континентальные мегаблоки плит Гондванского ряда (Африкано-Аравийскую и Индостанскую). Они являются секущими по отношению к земной коре.

• Секущие линеаменты жестко связаны с фигурой Земли и положением оси ее вращения. <...> Линеаменты представляются фиксированными в основном объеме мантии и не изменяющими своего положения относительно оси вращения планеты. <...> Предполагается внутримантийное заложение трансконтинентальных линеаментов».

Терміни та визначення. Згідно з визначенням [28] лінеамент — це різноранговий лінійний елемент геолого-геофізичного середовища, який знаходить своє відображення у лінійному рельєфно-ландшафтному рисунку. Мегалінеамент — лінеамент надрегіонального рангу протяжністю від декількох сотень до 1...2 тис. км. Суперлінеамент — лінеамент континентального і трансконтинентального рангу протяжністю в декілька тисяч кілометрів. Мега- і суперлінеаменти представляють собою досить широкі зони/пояси шириною від декількох десятків до декількох сотень кілометрів, що концентрують системи субпаралельних і кулісних лінеаментів/ розломів менших рангів. *Планетарна мегатріщинуватість* відповідає планетарній тріщинуватості за С. С. Шульцем [47], з акцентом на мережу розломів регіонального (і вище) масштабу.

Історичні передумови. Окремі структурні ланки, що складають суперлінеамент/тектонолінеаментний БІ-пояс, описано у величезній кількості наукових праць, особливо в зв'язку з проблемою південно-західної межі Східно-Європейської платформи (СЄП). Однак загальним питанням цієї глобальної структури, як найбільшого лінеаментного поясу планетарного рангу, що об'єднує різнорідні і різновікові тектонічні елементи, присвячено вкрай мало публікацій, серед яких необхідно назвати роботи В. А. Буша [4—6], Л. М. Расцветаєва [25, 26], А. В. Горячева [10].

Пріоритет виділення лінеаменту як трансєвразійської структури належить Г. Штілле [45], який визначив його у своїх головних відрізках ще на початку XX ст. (рис. 1), виділивши як суттєвіший для формування тектоніки Європи «...Балтийско-Подольский линеамент, который ... мог определять юго-западный край Фенносарматии; вместе с юго-западным краем Праскандика он образует «Гренландско-Черноморский линеамент». На продовженні лінії простягання Гренландсько-Чорноморського лінеаменту, з перервою через Чорне море і Туреччину, Г. Штілле виділив «Іранський лінеамент».

Слід зауважити, що об'єднуючи балто-подільську і праскандинавську частини в єдиний протяжний лінеамент (Гренландсько-Чорноморський), Г. Штілле іранську частину розглядав як окремий лінеамент, оскільки на той час ще не вистачало даних щодо тектоніки Чорноморського басейну.

У близькому розумінні до Г. Штілле, але таким, який має більше поширення у межі Азіатського континенту, лінеамент виділено В. А. Бушем на основі дешифрування дрібномасштабних космічних знімків під назвою Ельбсько-Загроського [4-6]. Ельбсько-Загроський лінеамент за В. А. Бушем — найбільший тектонолінеаментний пояс планетарного рангу протяжністю близько 10 000 км — від південно-східного краю Ісландії через Атлантику і Північне море до узбережжя Європи в напрямку Ютландського п-ова. Далі лінеамент проявляється напрямком долин Ельби і Одри, січе Карпати і виходить до Чорного моря у пониззі Дунаю. У Малій Азії лінеамент дешифрується в східній половині Понтійських гір, вздовж хребта Загрос досягає Аравійського моря і простягається паралельно всьому західному берегу півострова Індостан. Лінеамент віднесено В. А. Бушем до структур Рz-Кz-віку з різнорідним характером геодинамічних рухів: «Эльбско-Загросский линеамент сопровождается кайнозойскими вертикальными перемещениями на Фарерском пороге; структурами растяжения, затем сжатия в раннем палеозое и вертикальными перемещениями в среднем-позднем палеозое и мезозое в Европе (линия Торнквиста); альпийской зоной субдукции в Восточных Карпатах; альпийскими правосторонними сдвигами на Понтийско-Загросском отрезке, где линеамент образует сутуру современных плит и микроплит, и вертикальными перемещениями на эскарпе Индостана» [4, С. 29].

Л. М. Расцветаєв [25, 26] показує цей лінеамент як найбільшу трансконтинентальну правозсувну зону деформацій і розломів (Балтійсько-Іранську) (рис. 2), одну з «великих діагоналей Євразії», «глобальну зону сколювання», шо розсікає весь Альпійський пояс і йде далеко у межі суміжних материкових платформ. «Балтийско-Иранская зона правосдвиговых деформаций протягивается на 7.5 тыс. км от полуострова Ютландия до полуострова Оман через линии Торнквиста и Варты, Свентокшиские горы, Предкарпатье и Северную Добруджу и далее через центральную часть Черноморской впадины на северную ветвь Северо-Анатолийского разлома и Загросскую взбросо-сдвиговую зону» [25, С. 193]. При всій схематичності геодинамічної моделі, що показана на рис. 2, вона у принципі правильно, на наш погляд, відображає основні просторові і кінематичні характеристики зони тектонолінеаментного БІ-поясу та його співвідношень з навколишніми структурами. Перш за все це стосується



Рис. 1. Кардинальні лінеаменти Європи (за Г. Штілле [45]), що проявилися: 1 — перед альгонцькою революцією; 2 — одночасно з альгонцькою революцією; 3 — після альгонцької революції. Цифри на схемі арабські — лінеаменти: 1-1 — Уральський, 2-2 — Нордкап-Тіманський, 3-3 — південно-східного Скандика, 4-4 — Гебридський, 5-5 — Порк'юпайн, 6-6 — Гренландсько-Чорноморський, 6а-6а — південно-західного Скандика, 6б-6б — Балтійсько-Подільський, 7-7 — Адріатичний, 8-8 — Середземноморсько-Лапландський, або Середземноморсько-М'єський, 9-9 — Мораво-Сілезький, 10-10 — Іранський, 11-11 — Сирійський, 12-12 — о-вів Зеленого мису, 13-13 — Малоафриканський

однотипних в цілому правозсувних рухів уздовж лінеаменту, його прямолінійного січного характеру по відношенню до Середземноморського рухомого поясу і симетрії крупних тектонічних елементів оточення щодо його центральної частини. У цих загальних особливостях проявляється єдність розглянутого суперлінеаменту на всій його довжині, незважаючи на об'єднання в його складі і/або перетин абсолютно різних типів тектонічних структур.

За А. В. Горячевим [10, С. 33] «Североморско-Аравийская система разломов пересекает Евроазиатский континент с северо-запада на юго-восток и прослеживается примерно на 5000 км от датского побережья Северного моря до ирано-западнопакистанского (Макранского) побережья Аравийского моря, где срезается субмеридиональным



Рис. 2. Альпійський орогенний пояс у структурі Південно-Західної Євразії (за Л. М. Расцветаєвим [25, 26]): 1 - древ-ні платформи (А — Африкано-Аравійська, ВЕ — Східно-Європейська, І — Індійська, С — Сибірська); 2 -молоді платформи, 3, 4 -області активного прояву пізньоальпійських орогенних деформацій епігеосинклинального (3) або епіплатформного (4) типів (І, ІІ, ІІІ — західна, центральна і східна ланки Альпійського орогенного поясу Євразії); 5 -найкрупніші зони розломів Південно-Західної Євразії): Б-І — Балтійсько-Іранська, Б-С — Белуджистан-Си-бірська; міжрегіональні зсувні зони, що обрамляють Руський контрфорс Лавразії: К-К — Кримсько-Копетдазька, А-Б — Афгано-Балхаська (стрілки уздовж зон вказують на характер зсувного переміщення крил); 6, 7 - пізньоальпійські зони стиснення всередині орогенного поясу; 6 - регіональні підкидо-насувні зони, 7 - інші зони стиснення; 8 - зони розтягування новітнього часу (грабени, скидні зони, системи розсувів); 9 - найкрупніші зсуви і зони зору (грабени, скидні зони, системи розсувів); 9 - найкрупніші зони стиснення; 10 - передбачуваний напрямок відносного горизонтального переміщення крупних літосферних блоків уздовж границі з Альпійським поясом

Мокуро-Чаманским разломом. По ряду косвенных признаков система прослеживается к северо-западу в направлении Исландии и Гренландии, где на ее продолжении поднимаются Исландско-Фарерский и Исландско-Гренландский подводные пороги. Система состоит из ряда частных протяженных (порядка 500...1000 км), кулисообразно подставляющих друг друга звеньев, которые объединяют множество параллельных или сложноветвящихся сбросов, взбросов, надвигов и сдвигов, занимая полосу шириной до сотни километров». Серед таких ланок позначено: 1 — зона розломів Торнквіста — Тейсейра, 2 — Східно-Передкарпатська ланка, 3 — ланка розломів Інеболу-Варто в Туреччині, 4 — ланка системи розломів Загрос в Ірані, 5 — Макранська ланка розломів. А. В. Горячев звернув увагу на протилежну вергентність альпійських орогенів Карпат і Загросу; цю особливість ми розглядаємо як прояв ознак симетрії в загальній структурі БІ-поясу.

Незважаючи на розбіжності між згаданими дослідниками в оцінці протяжності лінеаменту та розташування його основних зон глибинних розломів, немає сумнівів у тому, що ці дослідники розглядали одну і ту ж глобальну структуру планетарного рангу.

ПОЗДОВЖНЯ І ПОПЕРЕЧНА СЕГМЕНТАЦІЯ ТА ЗОНАЛЬНІСТЬ

Аналіз геолого-геофізичної інформації і космозображень показує, що ширина БІ-поясу (зона його динамічного впливу), що концентрує сис-



Рис. 3. Загальна схема структури західної частини Альпійсько-Гімалайського рухомого поясу (за В. Є. Хаїним [37]) і кососічне до нього розташування Балтійсько-Іранського тектонолінеаментного поясу (синє штрихування): 1 складчасто-покривні споруди: цифри в кружках: 1 — Піренеї, 2 — Бетська Кордильєра, 3 — Ер-Риф, 4 — Телль-Атлас, 5 — Аппеніни, 6 — Альпи, 7 — Дінариди, 8 — Еллініди, 9 — Карпати, 10 — Балканіди, 11 — Гірський Крим, 12 — Великий Кавказ, 13 — Малий Кавказ, 14 — Ельбурс, 15 — Копетдаг, 16 — Східні Понтиди, 17 — Тавриди, 18 — Загрос; 2 — передові прогини і міжгірські западини; 3 — насувні фронти; 4 — зсуви

тему взаємопов'язаних близькопаралельних та кулісних глибинних розломів ПнЗ-ПдС-напрямків, становить значно більшу величину, ніж це раніше вважалося.

У поздовжньому своєму поширенні тектонолінеаментний БІ-пояс складається з ряду ланок, структур меншого рангу, які можна умовно об'єднати в чотири поздовжніх сегменти: 1 сегмент ТТ — трансєвропейська зона Тейсейра — Торнквіста, що включає Віяло Торнквіста і Датсько-Польський трог на північному заході з прилеглими субпаралельними структурами та розломними зонами Центральної і Північної Європи (лінії Ельби і Одри та ін.), Східні Карпати з суміжним Передкарпатським прогином, структури Центральної, Північної Добруджі і Переддобрудзького прогину; 2 — сегмент Чорного моря, що включає вал Андрусова-Архангельського з прилеглими лінійними трогами і глибоководними улоговинами; 3 — анатолійський сегмент — східна гілка Північно-Анатолійської розломної зони (E-NAFZ); 4 — іранський сегмент — складчастий Загрос з суміжним Месопотамським прогином. У такому розгляді тектонолінеаментний БІ-пояс є смугою шириною до 300 км, місцями (Загрос-Месопотамія) — до 500 км (рис. 3).

Зона Тейсейра — Торнквіста (TTZ) є основною складовою частиною тектонолінеаментного БІ-поясу — його північно-західним крилом одним з ключових мегалінеаментів Європи, що простягається безперервно приблизно на 2000 км від південно-західного краю Скандинавії і Балтійського моря на північному заході до Чорного моря на південному сході при ширині близько 150 км. Вперше на лінеамент звернув увагу польський дослідник В. Тейсейр у 1893 році, припустивши наявність похованої тектонічної лінійної структури поблизу Карпат, від Галичини до Південно-Східної Польщі (лінія Бердо-Нароль). Пізніше у 1908 році німецький геолог А. Торнквіст на основі геомагнітних даних наніс на карту продовження цієї лінії від Польщі до Сканії у Швеції. На сьогодні назва лінеаменту/зони Тейсейра — Торнквіста (TTL або TTZ) на честь цих двох вчених особливо закріпилася в літературі, хоча його зміст був неоднозначним, а в різні роки пропонувалося і використовується досі безліч близьких синонімів та інших найменувань для зони в цілому і для її фрагментів: Гренландсько-Чорноморський і/або Балтійсько-Подільський, Балтійсько-Чорноморський лінеаменти, ранньопалеозойський Рюгенсько-Поморський прогин, Поморсько-Свентокшиська



Рис. 4. Швидкісна модель поперечних сейсмічних хвиль у межах західної Європи і прилеглих територій, розрахована для глибини 80 км (за даними [72]). Різкий градієнт швидкостей збігається з древньою шовною зоною Тейсейра — Торнквіста (TTZ) між докембрійською і фанерозойською Європою. Пунктирні лінії — основні структурно-тектонічні елементи. Полігон обмежує область з доброю просторовою роздільною здатністю

зона каледонід, Датсько-Польський (лінеамент/ трог/прогин/борозна), Середньопольський (авлакоген), Польський трог, Добрудзько-Північноморський лінеамент, Свентокшисько-Добруджинська тектонічна смуга, Ростоцько-Ізмаїльський лінеамент та ін.

Характеристиці ТТZ і її окремих елементів присвячено величезну кількість публікацій у зв'язку з проблемою південно-західної межі СЄП. Ґрунтовний огляд досліджень з цієї проблеми до 1987 року проведено В. І. Хоменком [38]. Головним чином він охоплює роботи вітчизняних і західноєвропейських вчених, що стоять на традиційних фіксістських позиціях. З останніх оглядів, які враховують також дослідження на основі мобілістського підходу, можна вказати роботу [64].

У відповідності з поглядами фіксістського напрямку TTZ є палеорифтогенною структурою байкальського закладення в тілі докембрійської платформи, подібною древнім авлакогенам, таким як Дніпровсько-Донецький і Пачелмський, згодом багаторазово активізовану, в тому числі і в новітній час. Різноманітні блокові рухи про-



Puc. 5. Геолого-тектонічна карта регіону Віяло Торнквіста [71]: BBB — Blekinge Bornholm Block, BF — Borglum Fault, BG — Brande Graben, CDF — Caledonian Deformation Front, EL — Elbe Lineament, FBZ — Fennoscandian Border Zone, FF — Fjerritslev Fault, GA — Grimmen Axis, GT — Gluckstadt Trough, HG — Horn Graben, MH — Mon High, MNS — Mid North Sea High, MZ — Mylonite Zone, RFH — Ringkobing-Fyn High, RFZ — Romo Fault Zone, RG — Ronne Graben, SG — Skagerrak Graben, SNF — Sveconorwegian Front , STZ — Sorgenfrei-Tornquist Zone, TEF — Trans-European Fault, TIB — Trans-Scandinavian Igneous Belt, TTZ — Teisseyre-Tornquist Zone, VFZ — Vinding Fault Zone

тягом його тривалої історії привели до формування сучасної структури типу шовної зони, що відокремлює добайкальський кратон Фенносарматії або СЄП від фанерозойських платформ західної Європи і альпійського орогену Карпат.

У фізичних полях зоні ТТZ відповідають гравітаційні уступи і різка зміна характеру магнітного поля. З мегалінеаментом ТТZ пов'язана межа між «товстою» корою СЄП і відносно «тонкою» — Середньоєвропейської платформи. СЄП характеризується відносно високими швидкостями поперечних хвиль. Різкий перехід до більш низьких сейсмічних швидкостей фанерозойської Європи збігається з крайовою (шовною) зоною Тейсейра — Торнквіста) і фіксується до глибин не менше 140 км [72]. Зазна-



Рис. 6. Зона Тейсейра — Торнквіста на тектонічній схемі Центральної Європи [59]: рожевий — Східно-Європейський кратон/платформа (East European Craton (EEC)); блідо-рожевий — ймовірне розширення ЕЕС під потужним осадовим чохлом; помаранчевий — Варисциди; коричневий — Альпи та Карпати; змішане помаранчеве і блідо-рожеве штрихування — окраїна Балтики, покрита поясом Варисцидів, його передовим басейном; A-CDF — Alpine-Carpathian Deformation Front (Альпійсько-Карпатський деформаційний фронт); CDF — Caledonian Deformation Front (Каледонський деформаційний фронт); GF — Grójec Fault (розлом Грютца); KLF — Kraków-Lubliniec Fault (Краків-Люблинецький розлом); STZ — Sorgenfrei-Tornquist Zone (зона Зоргенфрей — Торнквіста); TTZ — Teisseyre-Tornquist Zone (зона Тейсейра — Торнквіста); VDF — Variscan Deformation Front (Варисканський деформаційний фронт)

чений перехід пов'язаний з різними величинами теплового потоку. На докембрійській СЄП значення поверхневого теплового потоку в цілому не перевищують 40 мВт/м². Навпаки, у фанерозойських регіонах Середньої Європи тепловий потік перевищує 60 мВт/м². Особливо важливим в аспекті цієї публікації і проблеми продовження шовної зони TTZ у південно-східному напрямку є поширення зони високого градієнта швидкостей поперечних сейсмічних хвиль через Чорноморський басейн у межі Туреччини (рис. 4). Це свідчить про те, що TTZ, як глибинна структура літосфери, не закінчується в регіоні Добруджі, а продовжується на південний схід через акваторію Чорного моря.



Рис. 7. Схема центральної частини Європи з розташуванням лінеаменту Тейсейра — Торнквіста [58]: В — Виcharest (Бухарест); FB — Саграthian Foreland Basin (Карпатський форландовий басейн — Передкарпатський передовий прогин); G — Gdansk (Гданськ); HCM — Holy Cross Mts (Свєнтокшиські гори); NDO — North Dobrogean Orogen (Північно-Добрудзький ороген); PCF — Ресеneaga-Camena Fault (розлом Печеняга-Камена); RRF — Rava-Ruska Fault (Рава-Руський розлом); SIF — Siret Fault (розлом Сірет); SOF — Solca Fault (розлом Солька)

Зона TTZ складається з серії зближених дуже протяжних субпаралельних і кулісоподібних лінійних структур та розломних зон. У поздовжньому напрямку зону TTZ зазвичай поділяють на ряд ланок [58, 59, 61, 71 та ін.] (рис. 5—7), з північного заходу на південний схід: 1— Віяло Торнквіста; 2— Датсько-Польський прогин; 3— Східні Карпати разом з Передкарпатським прогином; 4— Добруджа. Необхідно відзначити, що поділ на поздовжні сегменти і ланки багато в чому є умовним, оскільки між ними немає чітких меж, а окремі тектонічні елементи часто переходять з одних сегментів/ланок в інші за простяганням.

Північна частина ТТZ розщіплюється на дві гілки, утворюючи т.зв. Віяло Торнквіста [71], що включає область між Фенноскандінавською граничною зоною (FBZ — Fennoscandian Border Zone), зоною Зоргенфрей-Торнквіста (STZ — Sorgenfrei-Tornquist Zone) і каледонським деформаційним фронтом (CDF — Caledonian Deformation Front) (рис. 5). За своєю структурою Віяло Торнквіста подібне розщепленим північно-західним закінченням Дніпровсько-Донецького і Пачелмського авлакогенів (рифтогенів). Зі структурами розщеплення північно-західної частини TTZ на північ від Варшави пов'язане неоднозначне трактування різними дослідниками границі СЄП [3].

Південніше фронту каледонід і в цілому паралельно ТТZ проходить ще один крупний лінеамент/ розломна зона — лінія Ельби — Одри. З цим лінеаментом пов'язаний західний край каледонської складчастої зони. Ми розглядаємо лінеамент Ельби — Одри як західний умовний край БІ-поясу. Слід зауважити, що В. А. Буш вважав лінію Ельби — Одри одним з головних елементів Ельбсько-Загроського лінеаменту.

Датсько-Польський прогин/трог виділено В. Пожариським (т. зв. Датсько-Польська борозна або Середньопольський авлакоген) [65] як структура типу внутрішньоконтинентальної мезозойської геосинклиналі або авлакогену. Прогин простежується під утвореннями кайнозою від Північного моря через півострів Ютландія, о-в Рюген, північно-західну і центральну частини Польщі, Свєнтокшиські гори та Передкарпатський прогин до Північної Добруджі [13]. Прогин являє собою асиметричний грабен з відносно пологим західним і крутим східним крилом, виповнений породами тріасу, юри і крейди. В осьовій частині прогину домезозойські відкладення занурені до глибини 12 км. Прогин збігається з областю, де фундамент не має точно встановленого віку; можливо, він консолідований у добайкальський або байкальський час, а потім піддався регенерації в каледонську епоху. Прогину відповідає зона аномально великих глибин залягання поверхні Мохо (до 47...52.5 км, а у південній частині — до 60 км) шириною 65...100 км, виділена А. Гутерхом [11]. Обмеження Датсько-Польської борозни/трогу збігаються з чітко вираженими гравітаційними градієнтами. З віссю структури збігається ряд витягнутих в цьому ж напрямку аномалій теплового потоку.

Розвиток прогину розпочався, ймовірно, ще у байкальську тектонічну епоху [8, 42]. За даними Е. Зноско, В. С. Петренко, М. В. Чирвінської [13] у венді та палеозої, до раннього девону включно, прогин був рухливою жолобоподібною структурою типу інтракратонної зони, близької до авлакогенів, яка зазнала інтенсивних складчастих і розривних деформацій у період з кінця силуру до початку девону. Власне авлакогенна (грабенова) стадія розпочалася у пермі і тривала до нижньої крейди. У цей період авлакоген відрізнявся сильним зануренням (3-10 км), а також відсутністю метаморфізму, вулканізму і значною роллю континентальних осадів. З верхньої крейди територія переживала стадію синеклизи і часткової інверсії. В результаті інверсії у крейдяний час в центральній частині Датсько-Польського прогину утворився Середньопольський (Поморсько-Куявський) вал. В. С. Петренко, В. Пожариський [22] підкреслюють успадкованість мезозойського прогину від більш ранніх етапів розвитку авлакогену у палеозої і, можливо, у рифеї.

Багато дослідників відзначають, що авлакоген при наближенні до Карпат не зникає, а продовжується далі у південно-східному напрямку під флішевим покровом Польських і Українських Карпат і Передкарпатського прогину. На півдні Польщі розломи цього лінеаменту представлені розломами Сірет та Солька [70], похованими під карпатськими насувами і відкладами передового прогину. Матеріали дешифрування космічних знімків [17, 29] (рис. 8) чітко свідчать, що у межах самих Карпат простежуються чіткі лінії ПнЗ-ПдС орієнтування, що є продовженням структур Датсько-Польської борозни. Створюється враження, що Карпатські покриви, які були насунені і частково запечатали у міоцені більш глибинну структуру наявного тут прогину, були потім порушені субвертикальними розривами за оновленими давніми напрямками глибинних розломів зони TTZ.

За даними дешифрування космолінеаментів [17, 29] західним обмеженням Датсько-Польської борозни/трогу є Поморсько-Добруджинська зона розломів, яка обмежує зі сходу Західно-Європейську платформу, січе тектонічні покриви флішевих Карпат і зчленовується з лінеаментами Північної Добруджі; східним кордоном служить Балто-Подільський лінеамент



Рис. 8. Схема космотектонічного районування центральної частини Європи (Космотектонічна карта європейських країн — членів СЕВ і СФРЮ, гол. ред. М.В. Межеловський [17]): 1 — Франконська зона розломів, 2 — лінія Ельби, 3 — зона лінеаментів Плауен-Гера-Галле, 4 — лінія Одри, 5 — Одра-Кальмарсундський лінеамент, 6 — Поморсько-Добруджинська зона розломів, 7 — лінія Тейсейра — Торнквіста, 8 — Бидгош-Полоцький лінеамент, 9 — Шауляй-Світлогорська зона розломів, 10 — Свіслоч-Варшавська зона розломів, 11 — Клецко-Веліжська зона розломів, 12 — Кореліцька зона розломів, 13 — Чернігівсько-Полоцька зона лінеаментів, 14 — Прип'ятська зона розломів, 15 — Стрийсько-Пержанська зона розломів, 16 — лінія Карпінського, 17 — Прутський лінеамент, 18 — Дністровська зона розломів, 19 — Подільська зона розломів, 20 — Східно-Фракійсько-Гайсинський лінеамент, 21 — лінія Балатону, 22 — Закарпатський розлом, 23 — Дунайсько-Чернівецький лінеамент, 24 — Морі-Струмська зона розломів, 25 — Вардарська зона розломів, 26 — Драва-Муреська зона розломів, 27 — Західно-Моравська зона розломів, 28 — Загреб-Іваницька зона розломів, 29 — Будапештський лінеамент, 30 — Нижньотисенський лінеамент, 31 — Орадянський лінеамент, 32 — Радехівський розлом, 33 — П'єнінська шовна зона



Рис. 9. Схема основних розломів і лінеаментів Добруджі і прилеглих територій (з використанням даних [7, 17, 18, 20, 23, 53, 54, 56, 58, 62]): ЮД = Південно-Добрудзький блок, ЦД = Центрально-Добрудзький блок, СД = Північно-Добрудзький блок, ПДП = Переддобрудзький прогин, ДП = Дністровський перикратон. І — осьова зона Азово-Адріатичного мегалінеаменту, за [18], ІІ шовна зона Балтійсько-Іранського суперлінеаменту



Рис. 10. Схема рельєфу поверхні, близької до домезозойського фундаменту Чорноморського басейну з назвами основних структур (з [2], основане на карті А. Робінсона [67])

(за Г. Штілле) або власне лінія Тейсейра — Торнквіста, яка обмежує із заходу СЄП [17, 35].

У зону динамічного впливу TTZ в загальній БІ-смузі слід зараховувати, за нашими уявленнями, ряд близькопаралельних розломних зон та інших структурних елементів по обидва боки Датсько-Польського прогину і його південносхідного продовження, пов'язаних серією уступів у фундаменті та флексур у породах чохла. Чітко видно субпаралельність північно-західних напрямків TTZ і основних протяжних геологічних границь та розломних структур всередині каледонід і герцинід західної Європи (лінеаменти Ельби і Одри, розломи Судет та Передсудетської моноклиналі (Дольський розлом) та ін.), а також у межах Придністровського перикратонного прогину (Подільський і Котовсько-Одеський [7] глибинні розломи і ін.). Необхідно звернути увагу на наскрізний характер розломів, що простежуються від Судет через Карпати, Закарпатський прогин до Добруджі.

У межах Карпатської ланки, що включає (крім альпійського складчастого орогену) суміжні прогини (Закарпатський та Передкарпатський), а також прилеглу зі сходу зону перикратонних опускань південно-західного схилу УЩ, представлені різновікові (від кембрію до неогену) і різнорідні лінійні тектонічні структури (прогини, підняття, складчасті зони, розломи), що складно чергуються, розгалужуються, кулісно підставляють одне одного за простяганням, але в цілому підлеглі одному напрямку зони TTZ і сконцентровані у смузі шириною 200...300 км. Серед них: Закарпатський прогин з активним неогеновим вулканізмом; власне альпійський ороген Карпат з системою лускатих насувів і вергентністю у північно-східному напрямку; Львівський (Львівсько-Люблінський) палеозойський прогин, виповнений потужними товщами девону і карбону (прогину відповідає зона максимального занурення фундаменту уздовж лінії Тейсейра — Торнквіста); Львівсько-Люблінська крейдяна западина, що залягає над палеозойським прогином, вісь якої в загальних рисах збігається з зоною TTZ; Стрийський юрський прогин; Передкарпатський передовий міоценовий прогин з чітко вираженими зонами глиРис. 11. Принципова схема зсувних переміщень по розломах Чорного моря і суміжних областей (за Л. М. Расцветаєвим, 1980 [25]): 1 — найкрупніші системи розломів і шовні зони: ПБ — Передбалканська, ЗЧ — Західно-Чорноморська, СА — Північно-Анатолійська, Бр — Браїлівська, Е — Ереглінська, ЦЧ — Центрально-Чорноморська, В — Вилківська, О — Одеська, ВЧ — Східно-Чорноморська, Р — Раздольнейська, П — Перекопська, С — Сухумська, Л — Лечхумська, І — Імеретинська, Б — Батумська, К — Казбецька, Т — Тирниаузька, Пш — Пшекіська, А — Охтирська,



Ан — Анапська, Ср — Серединна, Ч — Черкеська, Н — Невинномиська, Е — Єйська, М — Молочанська; 2 — межа різкого виклинювання «гранітного» шару; 3, 4 — розломи, що встановлюються за геологічними (3) і геофізичними (4) даними; 5 — область стоншення «безгранітної» кори в центральній частині Чорноморської западини

бинних розломів північно-західного напрямку (Рава-Руський розлом, Ростоцько-Ізмаїльський глибинний шов і ін.); Придністровський перикратонний прогин. Під Передкарпатським прогином і Скибовими Карпатами бурінням встановлено поховану смугу дислокованих кембро-силурійських порід, витягнуту від Свентокшиських гір до Північної Добруджі.

Добрудзька ланка включає область складної мозаїки блоків у вузлі зчленування Мізійської плити, південно-східного орокліну Карпат і південно-західного краю СЄП; домінантним структурним фоном тут є розломи північно-західного орієнтування, субзгідні із загальним напрямком БІ/ТТΖ: Інтра-Мізійський, Капідава-Овідіу, Печеняга-Камена, Сфанту Георге (Георгіївський), Чадир-Лунгський, Подільсько-Дністровський, Одеський (Котовсько-Одеський) (рис. 9). Ці розломи розмежовують структурні зони/блоки Південної, Центральної, Північної Добруджі, Переддобрудзького прогину, Молдавської плити/Дністровського перикратону.

Основним шовним елементом зони БІ/ТТZ тут є розлом Печеняга-Камена, що розмежовує Мізійську і Скіфську платформи, блоки Центральної і Північної Добруджі з різною потужністю кори і контролює південно-західну границю СЄП [20, 53, 58, 62, 69]. Не менш важливою розломною структурою, з якою також пов'язують межу СЄП, виступає розлом Сфанту Георге, що обмежує Добрудзький ороген зі сходу і входить в систему Ростоцько-Ізмаїльського глибинного шва. Можна вважати, що вся область Добруджі разом з прилеглими ділянками Мізійської плити, Переддобрудзького прогину і Молдавської плити контролюється глибинними розломами зони БІ. Важливу роль тут відіграють також порушення схід-північно-східного напрямку — Перикарпатська розломна зона, Азово-Адріатичний мегалінеамент [18, 23], а також субмеридіональні розломи (рис. 9). Власне, положення Добрудзької ланки у вузлі перетину БІ-поясу і поперечних розломних зон у південно-західному куті СЄП визначає його складноблокову будову і високу сейсмічну активність.

Чорноморський сегмент займає серединну позицію в загальній конфігурації поясу між його північно-західним крилом (зоною TTZ) і південно-східним крилом (Східні Понтіди — Загрос). Глибинна будова Чорноморського басейну стала відомою після розшифровки її геофізичними методами [32, 67] (рис. 10). Основними структурами першого порядку тут є: північно-західний шельф, Західно-Чорноморська та Східно-Чорноморська западини, лінійно витягнуті підняття Андрусова-Архангельського виступає у вигляді своєрідної осьової зони/валу/перемички, по обидва боки якої розташовуються субсиметрично глибоководні западини. В загальному структурному плані басейну чітко виражені тектонічні зони північно-західного простягання, що продовжують напрямок розломних зон Добруджі і Переддобрудзького прогину, і що є за Л.М. Расцветаєвим [25] зонами концентрації правозсувних деформацій (рис. 11).

Під час трасування наскрізних трансчорноморських північно-західних швів на оглядових схемах і дрібномасштабних картах зазвичай виділяють дві основні лінії, що сходяться у південному напрямку на території Туреччини в зоні Північно-Анатолійського зсуву: 1 — Печеняга-Камена — Інеболу [6, 25, 36, 37]; 2 — т. зв. Одесько-Синопська розломна зона [36, 41]. Перша лінія має, за нашими уявленнями, превалююче значення — з нею пов'язана згадувана вище смуга різкого градієнта швидкостей поперечних сейсмічних хвиль (див. рис. 4), що розділяє літосферні блоки з різним тепловим потоком, а також зона високої сейсмічної активності, яка простежується від зони Вранча і Добруджі до східної гілки Північно-Анатолійської розломної зони (E-NAFZ). Розлом Печеняга-Камена впевнено трасується у південно-східному напрямку на з'єднання з E-NAFZ через шельф Чорного моря (Істрійський прогин) і континентальний схил вздовж палеодолини і підводного каньйону Дунаю [14, 19, 56]. У центральній частині Західно-Чорноморської западини його можна помітити за південно-західною границею найбільш прогнутої частини западини в рельєфі похованої покрівлі мезозою.

Намічається візуальний просторовий зв'язок Одеського (Котовсько-Одеського) [7] і Західно-Кримського розломів, які у свою чергу можуть бути пов'язані зі східним обмеженням Західно-Чорноморської западини і входити в єдину систему т. зв. передбачуваної Одесько-Синопської розломної зони. Остання, на думку ряду дослідників [36, 41], є головним трансчорноморським тектонічним елементом, що визначав історію розвитку регіону у мезо-кайнозої і розділяє дві відносно самостійні глибоководні чорноморські западини — Західну і Східну. Однак, як випливає з аналізу структурних карт акваторії [32, 39] за основними сейсмостратиграфічними реперними поверхнями мезо-кайнозою, КотовськоОдеський розлом безпосередньо не пов'язаний з Західно-Кримським. Останній простежується градієнтними уступами північного обмеження Західно-Чорноморської западини і виходить на континент значно південніше Котовсько-Одеської зони — в напрямку лиманів Шагани-Алібей. При цьому загальне простягання Західно-Кримсько-Алібейської зони паралельне напрямку розломних зон Печеняга-Камена-Інеболу і Алушта-Батумі, що передбачає їхній тісний динамічний зв'язок. Головні ж лінеаменти валу Архангельського і Синопського трогу орієнтовані відносно останніх під кутом 20...25° і є спряженими структурами меншого рангу. Таким чином, Одесько-Синопська «лінія» складається з декількох різноорієнтованих фрагментів, динамічна єдність яких, ймовірно, є опосередкованою.

Смуга між лініями Добруджа — E-NAFZ і Одеса — Синоп розділяє Чорноморський басейн на дві частини, різні за рисунком магнітного поля: західну з переважно схід-північно-східним і східну з північно-західним простяганням магнітних аномалій [10].

Південно-східна частина/крило БІ-поясу (Східний Понт — Загрос, 2500 км) трасується від північного узбережжя Туреччини в районі Інеболу на південний схід уздовж східної гілки Північно-Анатолійської розломної зони (E-NAFZ), потім вздовж Загроської гірськоскладчастої області. На всьому протязі тут встановлено правозсувні парагенезиси структур [21, 49]. На нашу думку, до цього поясу слід зараховувати також Месопотамський пізньокайнозойський прогин з його зонами крайових розломів (Євфрат-Катарський і Північно-Перський лінеаменти, за В. Д. Скарятіним і С. В. Анатасяном [27]) на підставі того, що Месопотамський прогин тісно пов'язаний зі складчастим Загросом і витягнутий уздовж єдиного напрямку з зоною TTZ.

У межах *Анатолійського сегменту* суперлінеамент БІ проявляється у вигляді вузької прямолінійної правозсувної зони E-NAFZ, яка чітко простежується від чорноморського узбережжя в районі Інеболу до оз. Ван (довжина 890 км, ширина 10...20 км). У північній частині E-NAFZ розділяє Західні і Східні Понтиди, у південній частині з нею пов'язана смуга юрсько-крейдяних офіолітів. На решті території Анатолії суперлінеамент БІ інтенсивно перероблений кіммерійськими і альпійськими дислокаціями північно-східного орієнтування, на домінантному тлі яких місцями проглядаються рідкі розосереджені елементи північно-західної системи мегатріщинуватості. Кількість таких елементів зростає на південь, в зоні переходу E-NAFZ до гірсько-складчастої області Загрос. Безпосередній перехід має кулісний характер через гірську систему Бітліс, що підставляє з півдня E-NAFZ і зчленовується на південному сході з Загросом. Анатолійська і Загроська ланки БІ-поясу відокремлюються одна від одної поперечною міжмегаблоковою границею північно-східного напрямку — Східно-Анатолійською розломною зоною. На приналежність зазначених ланок до різних літосферних блоків (мегаблоків) вказує і різний стиль неотектонічних рухів уздовж їхніх осьових зон: правозсувний в Анатолійській ланці і правозсувно-підкидний — у Загроській.

Загроський сегмент (довжина 1300 км, ширина 500 км) складається рядом смугоподібних структурно-формаційних зон, орієнтованих субпаралельно і підлеглих єдиному напрямку БІ-поясу (рис. 12): 1 — Месопотамський передовий прогин (Передзагроський), що включає зовнішнє (західне) і внутрішнє (східне) крила і осьову частину; 2 — власне складчаста система Загросу, що складається з зовнішньої широкої (200 км) і внутрішньої вузької (менш ніж 100 км) зон, розділених Головним підкидом, за яким внутрішня зона підкинута на зовнішню; З — Хамаданська зона складної і до кінця ще не розшифрованої будови [36]; 4 — крайовий вулкано-плутонічний пояс Урмія-Дохтар. Такий склад (крім Месопотамського прогину) відповідає широкому розумінню Загроської складчастої системи (Загросідам, Загрідам) за В. Є. Хаїним [36]. Із заходу сегмент межує з Аравійською плитою, зі сходу — з Іранським серединним масивом. На відміну від Анатолійського Загроський сегмент характеризується переважною домінантою північно-західних орієнтувань тектонічних структур, успадкованих від домезозойського структурного плану і регенерованих на альпійському етапі. Основна фаза формування Головного підкиду Загросу оціню-



Рис. 12. Схема тектоніки Східно-Анатолійсько-Малокавказько-Іранської області (з [36], за Тектонічною картою Світу масштабу 1: 15 000 000): 1 — стародавні континентальні платформи (у межах суші); 2-3 — чохол серединних масивів: 2 — слабко деформований, 3 — сильно деформований (Ельбурс, Аладаг-Біналуд); 4 — зовнішні зони альпійського пояса — вапнякові, флішові; 5 — внутрішні зони альпійського пояса з переважанням древніх метаморфітів; 6 — те ж, мезозойських і палеогенових осадових та вулканічних утворень; 7- офіоліти (контури перебільшені); 8 — моласи передових і міжгірських западин; 9 — неогеново-четвертинні вулканіти; 10 — ділянки морських басейнів з корою океанського або субокеанського типу; 11 — шельфи і мілководдя; 12 — насуви; 13 — зсуви; СА — Севано-Акеринська зона, УД — вулканічний пояс Урмія-Дохтар

ється пізньою крейдою, хоча його закладення проявилося ще у венді [46]. Паралельно Головному підкиду проходить трохи більш крутий і більш молодий правий зсуво-підкид, який, імовірно, може становити південно-східне продовження Північно-Анатолійського розлому [36].

Макранська ланка продовжує на південний схід основні структурно-формаційні та розломні зони Загроського сегменту БІ-поясу, плавно дугоподібно змінюючи їхнє простягання з північно-західного на субширотне. Ланка є перехідною областю у вузлі перетину двох глобальних діагональних тектонолінеаментних поясів — Балтійсько-Іранського і Белуджистан-Сибірського (див. рис. 2). Дугоподібне зчленування структур викликано взаємовпливом зазначених поясів, накладенням/інтерференцією їхніх полів напружень.

Необхідно зауважити, що хоча формально БІпояс у своєму найбільш яскравому і безперервному вираженні складається вищеописаними сегментами, за непрямими ознаками з певними перервами його можна простежити значно далі в обидва боки від своїх крайніх ланок: на півночі — аж до Ісландії і Гренландії [4—6, 10, 45], на півдні — до південно-західного краю Індостану і Малайзії [4—6, 25].

ВІК ФОРМУВАННЯ, УСПАДКОВАНІСТЬ РОЗВИТКУ, МІГРАЦІЯ ТЕКТОГЕНЕЗУ

БІ-суперлінеамент є довготривалим як наскрізна структура трансконтинентального рангу. Окремі елементи цього поясу дислокацій мають безумовно добайкальске закладення і є давніми ослабленими зонами Євразійського материка [25]. Зона ТТZ оформилася, мабуть, ще у верхньому протерозої (рифеї) [8, 42]. У ранньому палеозої уздовж неї вже був прогин з накопиченням мілководно-басейнових формацій, який був інвертований і зазнав складчастих деформацій в кінці силуру і початку девону [13]. У мезозої тут розвинувся рифтогенний трог/грабен, що зазнав основне прогинання з пермі до нижньої крейди, а з верхньої крейди — стадію синеклізи і локальних інверсій. Рава-Руський перикратонний розлом закладався, ймовірно, ще на початку рифею; в результаті каледонської складчастості уздовж розлому виникла вузька (4...10 км) смуга складчастих силурійских утворень; у міоцені зона розлому служила північно-східною межею Зовнішньої зони моласового прогину з амплітудами занурень до 3000 м [33]. Літо-фаціальна межа вздовж граничних скидів орогену Північної Добруджі зафіксована з пізнього тріасу, визначаючи кордон суші, піднятих і опущених блоків [56]. Розлом Інеболу-Варто існував починаючи як мінімум з раннього палеозою, коли він контролював розподіл потужностей ордовік-нижньокарбонового, а потім кіммерійського комплексів відкладів на межі Західних і Східних Понтид [10]. Складчаста система Загросу являє собою міогеосинклинальний прогин тривалого розвитку (венд-палеоген), котрий зазнав складчастість і орогенез у пізній крейді й у міоцені. Глибинні розломи осьової зони Загросу контролювали накопичення соленосних відкладів венду — нижнього кембрію, таким чином, вік лінеаменту — довендський. Основні підкиди Загросу були сформовані у крейді, а сучасна складчаста структура зовнішньої і внутрішньої зон — у пізньому неогені і квартері [10].

Таким чином, фіксується певна стаціонарність просторового розташування БІ-поясу і успадкованість розвитку його окремих частин протягом усього фанерозою. Цікавою особливістю поясу є міграція тектогенезу в часі з північного заходу на південний схід як для всього поясу в цілому, так і для його окремих частин у періоди основних фаз тектонічної активності. Так, у північно-західному крилі поясу найбільш інтенсивні тектонічні рухи відбувалися в каледонську, герцинську і кіммерійську епохи, тоді як у південно-східному крилі — у кіммерійську і альпійську. При цьому змінювався загальний динамічний режим територій — від рифтогенного на північному заході до колізійно-зсувно-орогенного на південному сході. Є показовим також омолодження віку складчастості за простяганням палеорифтогена TTZ — від каледонської на північному заході до кіммерійської на південному сході (зона Тулча) [8].

Суперлінеамент проявляє деяку симетричність у структурі своїх північно-західного і південно-східного крил і у розташуванні зовнішнього до альпід платформного оточення по відношенню до центральної ланки поясу на відрізку Чорного моря, що ми розглядаємо як прояв єдності його загальної структури, історії та динаміки розвитку. Так, північно-західне крило на своєму значному протязі відокремлює докембрійську СЄП через систему перикратонних і передових прогинів від альпійського складчастого орогену Карпат. Точно такий перехід, але у зворотному порядку фіксується для південно-східної (іранської) частини лінеаменту: від альпійського складчастого орогену Загросу через Месопотамський прогин до докембрійської Аравійської платформи. Звертає на себе увагу симетричність напрямків вергентності альпійської складчастості Карпат і Загросу. Явна симетрія спостерігається і у центральній ланці поясу (у структурі Чорного моря) — в розташуванні Західної і Східної улоговин відносно валу Андрусова-Архангельського, який збігається з осьової частиною БІ-поясу. У межах Анатолійського блоку суперлінеамент частково завуальований і перероблений домінантними поперечними ЗхПдЗх-СхПнСх-дислокаціями альпійського часу, однак і тут він «проглядає» у вигляді вузької зони молодого Північно-Анатолійського зсуву і окремих невеликих розсіяних фрагментів тектонічних структур і зон планетарної мегатріщинуватості північно-західного орієнтування.

КІНЕМАТИКА І МАЛОАМПЛІТУДНІСТЬ

З огляду на кососічне положення БІ-поясу відносно Середземноморського альпійського поясу принципово важливо з'ясувати амплітуду або хоча б ранг тектонічних дислокацій, пов'язаних з їхнім розвитком і взаємовпливом, насамперед масштаб поздовжніх переміщень уздовж осі БІпоясу. У літературі є багато коментарів на цей рахунок, зокрема альтернативних, лише деякі з них мають під собою серйозну аргументацію, але частіше засновані на гіпотетичних моделях. В. А. Буш [6] допускає значні (в кілька сотень км) правосторонні зсувні переміщення уздовж осі БІ-поясу, припускаючи, що останній виступав разом з іншими розломними зонами ПнЗхпростягання у вигляді своєрідних паралельних «колій» або трансформ, за якими зсувалися окремі геоблоки/плити. Л. М. Расцветаєв [25] також допускає значні правозсувні переміщення уздовж БІ, при яких західна частина Середземноморського поясу зміщувалась на північний захід, а східна — на південний схід. Мобілістські реконструкції припускають правозсувні переміщення близько 300 км уздовж сутури Мезо-Тетису, що приблизно збігається з сучасною зоною E-NAFZ [30]. Тут необхідно зазначити встановлені за даними сучасних землетрусів і GPS-спостережень правозсувні рухи вздовж лінії E-NAFZ і Загросу зі швидкістю до 26 мм на рік [49]. Описано численні приклади пізньочетвертинних правих зсувів річкових і яружних долин та інших молодих форм рельєфу на десятки і сотні метрів уздовж E-NAFZ; при цьому вертикальна складова переміщень істотно поступається зсувній, а місцями її немає [31].

Аналіз літератури по зоні ТТZ показує, що в різні періоди, ймовірно, вона мала різну кінематику. Так, передбачається, що під час каледонського орогенезу вона мала лівозсувний тип [66], у пізньокам'яновугільний і ранньопермський час — була повторно активізована з імовірним правостороннім рухом [52, 66], при цьому мобілістські інтерпретації [63] допускають переміщення, відповідно, більше 500 км і 300...350 км. У період пермо-тріасу і пізньої юри формування Датсько-Польського трогу вказує на регіональний режим розтягування; під час пізньої крейди — раннього палеоцену і приблизно одночасно з початком альпійського стиснення у південно-східній Європі зона ТТΖ була омолоджена тектонічною інверсією з утворенням Польського підняття в умовах правого зсуву зі стисненням [63, 66]. Деякі дані вказують на правозсувні герцинсько-альпійські переміщення блоків фундаменту амплітудою 30 км уздовж горсту Ромелесе в Сканії [66]. За даними, що підтверджені бурінням, внутрішня зона Передкарпатського прогину насунута на зовнішню з амплітудою до 20 км; у свою чергу флішева зона у Східних і Західних Карпатах тектонічно перекриває внутрішній край Передкарпатського прогину з амплітудою перекриття до 20...28 км [36].

Альтернативні судження мають місце відносно кінематики розлому Печеняга-Камена: правозсувної, згідно з [58]; лівозсувної з пізнього тріасу до середини крейди, з правозсувною інверсією в середній-пізній юрі [48, 57], лівозсувної [60]. Нерідко у одних і тих же дослідників розлом отримує різну характеристику (ліво- або правозсувну) [54, 55]. Також є альтернативними уявлення про рухи ПнЗх-ПдСх-напрямків у межах Чорноморського сегмента БІ-поясу: істотно правозсувні за [25, 26, 36]; лівозсувні уздовж Одесько-Синопської «лінії» і західного обмеження валу Андрусова [55, 68], там же — правозсувні [60]. Прихильники різних поглядів наводять свої аргументи, які швидше засновані на ймовірних геодинамічних модельних побудовах, ніж на конкретних фактах переміщень, підтверджених реальними структурними маркерами.

Проте про відсутність масштабних у кілька сотень кілометрів сумарних зсувних переміщень уздовж TTZ свідчить поперечний Паннонсько-Волинський прогин стародавнього закладення, описаний в роботах [9, 12, 40], шириною до 200 км, що простягається з південного заходу на північний схід поперек складчастої споруди Східних Карпат (під Карпатами), зчленовуючись на сході з Волино-Оршанським рифейським прогином СЄП. Порівняно стійке положення Паннонсько-Волинського прогину у просторі протягом осяжної геологічної історії може служити одним з доказів неспроможності мобілістської моделі розвитку Паннонсько-Карпатського регіону та масштабних сумарних переміщень уздовж зони TTZ [10]. У свою чергу, палеогеографічні карти поширення верхньорифейських відкладень [16] і реконструкції розташування рифейських авлакогенів СЄП [50] свідчать про збереження в загальних рисах верхньорифейського структурного каркасу до теперішнього часу, особливо північно-західних обмежень УЩ і Воронезького кристалічного масиву. Є показовою також відсутність масштабних зсувів у вузлі перетину БІ-суперлінеаменту з трансрегіональним Азово-Адріатичним мегалінеаментом мезокайнозойського віку [18].

Підсумовуючи, можна зробити висновок про відсутність масштабних сумарних зсувних переміщень в кілька сотень кілометрів уздовж осі БІпоясу, хоча на регіональному рівні у різні періоди часу мали місце зміщення порядку декількох десятків, а можливо і до 100...150 км, значною мірою компенсовані у періоди інверсій. Відносно протяжності всього поясу, яка оцінюється значеннями як мінімум 5000 км і як максимум 11000 км, сумарні зсувні дислокації становлять зазвичай 1-2% і можуть бути охарактеризовані у планетарному масштабі як відносно малоамплітудні, співмірні з потужністю літосфери.

Особливо важливо підкреслити, що геодинамічний режим формування і розвитку поясу в цілому не можна описати будь-яким одним типом — рифтогенним, чи колізійним, чи ще іншим. У ньому періодично чергуються, як у поздовжньому напрямку, так і у поперечному, регіональні і надрегіональні зони розтягування (рифтогенні) і стиснення (колізійні). В цьому проявляється глобальність поясу, об'єднання/ сполучення в ньому різних геодинамічних режимів, а також хвильовий характер тектонічного процесу, його гомологічність і самоподібність на різних ієрархічних рівнях.

ЗІСТАВЛЕННЯ З ТЕКТОНОЛІНЕАМЕНТНИМ ПОЯСОМ КАРПІНСЬКОГО

Багато дослідників раніше звертали увагу на велику схожість БІ- і Карпінського (Сарматсько-Туранського) суперлінеаментів, підкреслюючи їхнє першорядне значення для пояснення багатьох основних питань теоретичної і регіональної тектоніки на південному заході Євразії [8, 43, 44]: «Для обоих линеаментов характерны относительная автономность и чрезвычайно высокая мобильность их палеодинамического состояния, выражающаяся в несравненно большей тектонической активности в их пределах по сравнению с соседними территориями на протяжении всего фанерозоя. Оба линеамента выделяются повышенными значениями тепловых потоков» [8, С. 130]. Порівняльний тектонічний аналіз показує разючу подібність не тільки в найзагальніших морфогенетичних особливостях будови, історії формування, поздовжньої сегментації, динамічного режиму і міграції тектогенеза цих структур в цілому, але і виявляє таку ж схожість між їхніми окремими ланками і сегментами та послідовністю їхнього розташування.

У найзагальніших аспектах обидва лінеаменти однаково поділяються у поздовжньому напрямку на частини («крила») найбільшого рангу, різні за домінантним динамічним режимом формування — переважно палеорифтогенні північно-західні і колізійно-зсувно-орогенні південно-східні. При цьому однаково змінюється вік головних фаз тектогенезу за простяганням лінеаментів: палеозой-мезозойський для північно-західних «крил» і мезо-кайнозойський — для південносхідних. Таким чином, обидва лінеаменти мають дивовижну схожість щодо міграції тектогенезу.

Зовсім разючою є подібність поясів, проявлена у їхній однаковій поздовжній сегментації/

Рис. 13. Схема, що ілюструє парні тектонотипові аналогії між різними структурними ланками Балтійсько-Іранського (БІ) і Карпінського (Сармато-Туранського (СТ)) тектонолінеаментних поясів: ВТ — Віяло Торнквіста; ПГ — Прип'ятський грабен (розщеплений); ДПТ Датсько-Польський трог; ДДЗ — Дніпровсько-Донецька западина: СВСО — Свентокшиська складчаста область; ДСО — Донецька складчаста область; ЧВ — Чорноморська западина; ПКВ — Прикаспійська западина; САСЗ — Північно-Анатолійська зсувна зона; МГСЗ — Мангишлак-Гіссарська зсувна зона; СО-ЗіМ — складчастий ороген Загросу і Макрана; СОЮТ – складчастий ороген Південного Тянь-Шаню



зональності, послідовності чергування окремих структурних ланок, що знаходять парні тектонотипові аналогії (рис. 13). Перш за все, звертає на себе увагу подібність структур дистальних закінчень поясів — це двопроменеве рифтогенне розщеплення на північному заході (Віяло Торнквіста ~ Прип'ятський розщеплений прогин) і дугоподібне колізійно-орогенне зчленування з поперечною діагональною тектонолінеаментною системою на південному сході (Макранська ланка БІ-поясу ~ Південно-Тяньшаньська ланка лінеаменту Карпінського). Показовою також є однотипна структурна позиція центральних ланок, представлених в обох випадках молодими морськими басейнами з субокеанічною корою — Чорноморським і Каспійським, які поділяють істотно палеорифтогенні і колізійно-зсувноорогенні «крила» обох поясів. Виявляють близькі аналогії і самі «крила»: Датсько-Польський трог/авлакоген подібний авлакогену Великого Донбасу, при цьому Свентокшиська складчаста споруда відповідає складчатому Донбасу [43, 44]; зона Північно-Анатолійського зсуву — близький гомолог зони Донбас-Зеравшанського трансрегіонального постколізійного зсуву (Мангишлак-Гіссарської системи розломів).

Таким чином, всі ці структурні аналогії абсолютно чітко вказують на загальний механізм і загальну історію формування обох поясів, тісно пов'язаних з глобальним полем напружень земної кори. Природу цього глобального поля напружень дослідники пов'язують з ротаційним режимом Землі і земних оболонок: «...наблюдаемый сегодня и сформировавшийся в позднеальпийскую эпоху (за последние 45 млн лет) структурный рисунок линейных дислокаций земной коры свидетельствует о том, что во внешней оболочке геоида важную роль играет общая тектодинамическая обстановка тангенциального меридионального сжатия и широтного растяжения (глобальное поле напряжений земной коры) ...» [24].

ВИСНОВКИ

1. Балтійсько-Іранський суперлінеамент/тектонолінеаментний пояс є найбільшою трансєвразійською структурою планетарного рангу невід'ємною складовою частиною закономірно просторово орієнтованого стародавнього регматичного розломного каркаса Євразії, утвореного на ранніх етапах формування жорсткої земної кори під впливом глобальних напружень, пов'язаних з фактором ротації Землі і земних оболонок. Найбільш явно і безперервно лінеаментний пояс проявляється від Північного моря і південно-західної частини Скандинавії до затоки Оман і Макранських гір (5100 км). Разом з Макранською ланкою протяжність поясу становить 5800 км. Ширина поясу оцінюється нами в 250...300 км, місцями (Загрос-Месопотамія) до 500 км.

2. Балтійсько-Іранський пояс вкрай різноманітний на різних своїх відрізках, складається з різних морфо-тектонічних геоструктурних елементів, субпаралельних, які кулісно підставляють одне одного за простяганням — розломних зон, лінійних грабенів, валоподібних підняттів і горстів, складчастих прогинів і орогенів, шовних зон та ін. Він розсікає або роз'єднує (є граничним) дуже різні за своїм характером та рангом блоки земної кори (древні і молоді платформи, щити, зони мезо-кайнозойської епіплатформної орогенії, складчасті колізійні зони), будучи при цьому єдиною трансконтинентальною наскрізною структурою тривалого успадкованого розвитку на тлі численних інверсій і міграцій тектогенезу. Спряження та об'єднання всіх цих різнорідних елементів у складі одного поясу концентрації глибинних розломів контролюється довготривалою квазістаціонарною впорядкованою планетарною регматичною мережею, її північно-західною діагональною системою.

3. Балтійсько-Іранський пояс поділяється у поздовжньому напрямку на дві частини найбільшого рангу — переважно палеорифтогенну (Сканія — Добруджа) і колізійно-зсувно-орогенну (Східний Понт — Макран), які розрізняються між собою за віком головних фаз тектогенезу, структурним малюнком розломів і переважним динамічним режимом формування. Перша розвивалася в умовах домінантної транстенсії (зсуву з розтягуванням), особливо на каледонському і герцинському етапах розвитку з венду і до початку крейди, для другої більш характерними є умови транспресії (зсуву зі стисненням) в Мz-Кz-епоху розвитку.

4. Кінематика обох крил суперлінеаменту за мезо-кайнозойський (можливо і більш давній) період розвитку характеризувалася істотно правозсувною складовою деформацій і малоамплітудних дислокацій, хоча на регіональному рівні вторинних і оперяючих структур у різні періоди часу мали місце інші типи рухів. Порівняно із протяжністю всього поясу, що оцінюється зна-

ченнями від 5000 до 11000 км, сумарні зсувні дислокації зазвичай не перевищують 1-2% і можуть бути охарактеризованими у планетарному масштабі як відносно малоамплітудні.

Геодинамічний режим формування і розвитку поясу в цілому не можна описати будь-яким одним типом — рифтогенним, або колізійним. У ньому періодично чергуються, як у поздовжньому напрямку, так і у поперечному, регіональні і надрегіональні зони розтягування (рифтогенні) і стиснення (колізійні). В цьому проявляється глобальність поясу, об'єднання/сполучення в ньому різних геодинамічних режимів, а також хвильовий характер тектонічного процесу, його гомологічність на різних ієрархічних рівнях.

5. Балтійсько-Іранський тектонолінеаментний пояс виявляє разючу подібність у багатьох аспектах аж до деталей з поясом Карпінського (Сарматсько-Туранським суперлінеаментом). Для обох відзначаються однакові закономірності будови і розвитку, що передбачає їхній тісний генетичний та динамічний зв'язок. Спостерігається абсолютно аналогічне розділення лінеаментних поясів на істотно рифтогенні Рz-Мzчастини у своїх північно-західних крилах і істотно колізійно-зсувно-орогенні Мz-Кz-частини у південно-східних крилах.

6. Балтійсько-Іранський суперлінеамент є наскрізною структурою косого спряження по відношенню до Середземноморського рухомого поясу альпійської складчастості. Під кутом 20...30° він розсікає цей субширотний ЗхПнЗх-СхПдСх-пояс і виходить за його межі в області більш давньої консолідації. З огляду на довготривалий (верхній протерозой — кайнозой) характер БІ-поясу і його квазістаціонарне положення протягом всієї історії формування, а також відсутність масштабних в кілька сотень кілометрів зсувних переміщень уздовж нього та у вузлах перетину з поперечними тектонолінеаментними поясами близького рангу, є малоймовірною мобілістська модель сходження Афро-Аравії і Євразії. Більш вірогідною є модель деструкції (дроблення) колись єдиного Афро-Євразійського континенту у потенційно зсувному полі відносно малоамплітудних (у планетарному масштабі) деформацій.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Анохин В. М. Глобальная дизъюнктивная сеть Земли: строение, происхождение и геологическое значение. СПб.: Недра, 2006. 161 с.
- 2. Афанасенков А. П., Никишин А. М., Обухов А. Н. *Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточ*но-Черноморского региона. Москва: Науч. мир, 2007. 172 с.
- 3. Богданов А. А. Восточно-Европейская платформа / Тектоника Европы: Объясн. зап. к Междунар. тектон. карте Европы. 1:2500000. Москва: Наука, 1964. 50 с.
- 4. Буш В. А. Системы трансконтинентальных линеаментов Евразии. Геотектоника. 1983. № 3. С. 15—31.
- 5. Буш В. А. Системы трансконтинентальных линеаментов Евразии. Космическая информация в геологии. Отв. ред.: В. Г. Трифонов, В. И. Макаров, Ю. Л. Сафонов, П. В. Флоренский. Москва: Наука, 1983. С. 287—298.
- 6. Буш В. А. Трансконтинентальные линеаменты и проблемы мобилизма. *Геотектоника*. 1983. № 4. С. 14—25.
- 7. Верховцев В. Г. Новейшая тектоника Западного (Преддобружского) сегмента Скифской плиты и прилегающих территорий. *Геофиз. журн.* 2010. **32**, № 3. С. 29–42.
- 8. Гарецкий Р. Г., Тешке Г. Ю. Добруджско-Североморский и Сарматско-Туранский линеамент. Орогенный этап развития варисцид Средней Европы и СССР. Москва: Наука, 1977. С. 120—131.
- 9. Глушко В. В. Тектоника и нефтегазоносность Карпат и прилегающих прогибов. Москва: Недра, 1968. 264 с.
- 10. Горячев А. В. Глубинные разломы и структурные неоднородности земной коры. *Неоднородность тектоносферы и развитие земной коры*. Москва: Недра, 1986. С. 32—48.
- 11. Гутерх А., Матежок Р., Пайхель Я., Перхуць Э. Строение земной коры вдоль VII Международного профиля ГСЗ на территории Польши / *Строение земной коры и верхней мантии по данным сейсмических исследований*. Киев: Наук. думка, 1977. С. 148—158.
- 12. Заика-Новацкий В. С., Чекунов А. В. Основные особенности сочленения Восточно-Европейской платформы с Галицкой складчатой областью байкалид. *Сов. геология*. 1970. № 12. С. 3–15.
- 13. Зноско Е., Петренко В. С., Чирвинская М. В. Основные черты тектонического строения западной окраины Русской плиты и ее обрамления. Вестник Моск. ун-та. Сер. Геология. 1977. № 3. С. 21–30.
- 14. Карта рельефа дна Черного и Азовского морей м-ба 1:1250000. Н. В. Багров, Е. Ф. Шнюков, Н. А. Маслаков, Е. Е. Шнюкова, А. А. Пасынков, И. В. Глущенко, С. А Карпенко, Б. А. Вахрушев; ГНУ «Отделение морской геологии и осадочного рудообразования» НАН Украины, Таврический национальный университет МОН Украины, НИЦ «Технологии устойчивого развития» ТНУ. Симферополь, 2012.
- 15. Каттерфелъд Г. Н., Чарушин Г. В. Глобальная трещиноватость Земли и других планет. *Геотектоника*. 1970. № 6. С. 3—12.
- Крашенинникова О. В. Рифейские отложения УССР и условия их образования. Международный геологический конгресс, XXI сессия. Стратиграфия позднего докембрия и кембрия (Доклады советских геологов). М: АН СССР, 1960. С. 25—36.
- 17. Космотектоническая карта европейских стран членов СЭВ и СФРЮ. М-б 1: 1 000 000. Гл. ред. Н. В. Межеловский. СЭВ, 1987.
- 18. Ломакин И. Э., Покалюк В. В., Кочелаб В. В., Шураев И. Н. Азово-Адриатический мегалинеамент трансрегиональная зона сопряженных глубинных разломов юга Европы. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2018. № 2. С. 29–47.
- 19. Международная тектоническая карта Европы. М-б 1: 5 000 000. Третье издание. Гл. ред. Хаин В. Е, Леонов Ю. Г. ЮНЕСКО, РАН, 1996.
- 20. Мокряк I. М. До питання про положення західної границі Східноєвропейської платформи. *Мінеральні ресурси України*. 2014. № 2. С. 15—19.
- Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии. *Тр. Геолог. ин-та.* Вып. 598. Трифонов В. Г., Додонов А. Е., Бачманов Д. М., Иванова Т. П., Караханян А. С. и др.; Отв. ред. В. Г. Трифонов, О. Аммар. М.: ГЕОС, 2012. 216 с.
- 22. Петренко В. С., Пожариский В. Проблема тектонического строения юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы. Изв. вузов. Сер. Геология и разведка. 1972. № 4. С. 17—24.
- 23. Покалюк В. В., Ломакин И. Э., Шураев И. Н. Тектонолинеаментные зоны восток-северо-восточного простирания как составной елемент регматогенного разломного каркаса Балкано-Черноморского региона. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі.* 2018. № 18. С. 40–52.
- 24. Расцветаев Л. М., Тверитинова Т. Ю. Вращение Земли и планетарные зоны скалывания, сжатия и растяжения. Материалы Четвертой Тектонофизической конференции. Разд. 5. Общие теоретические вопросы тектонофизики и проблемы геодинамики. Москва: ИФЗ РАН, 2016. Т. 2. С. 545—552.

- 25. Расцветаев Л. М. Закономерный структурный рисунок земной поверхности и его динамическая интерпретация. Проблемы глобальной корреляции геологических явлений. Москва: Наука, 1980. С. 145—216.
- 26. Расцветаев Л. М. Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений и деформаций земной коры. Поля напряжений и деформаций в земной коре. Москва: Наука, 1987. С. 171–181.
- 27. Скарятин В. Д., Атанасян С. В. Линейные и кольцевые структуры некоторых районов Евразии. Изв. высших уч. заведений. Геология и разведка. 1976. № 11. С. 135—148.
- 28. Тверитинова Т. Ю. Линеаменты как отражение структурного каркаса литосферы (Линеаменты разломы или фантомы?). *Альманах Пространство и Время*. 2013. **4**, вып. 1. Спец. вып. СИСТЕМА «ПЛАНЕТА ЗЕМЛЯ.
- 29. Тектонические структуры центральной и юго-восточной Европы по материалам космических съемок. Объяснительная записка к Космотектонической карте европейских стран-членов СЭВ и СФРЮ масштаба 1:1 000 000 / Коллектив авторов / Главный редактор Н. В. Межеловский. — Секретариат СЭВ, 1987. — 63 с
- 30. Трифонов В. Г. Неотектоника Евразии. Москва: Науч. мир, 1999. 138 с.
- 31. Трифонов В. Г., Соболева О. В., Трифонов Р. В., Востриков Г. А. Современная геодинамика Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. *Тр. ГИН РАН.* 2002. Вып. 541. 225 с.
- 32. Туголесов Д. А., Горшков А. С., Мейснер Л. Б. и др. *Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впади*ны. Москва: Недра, 1985. 215 с.
- 33. Утробін В. М., Вітрик С. П. Роль глибинних розломів у формированні Передкарпатського крайового прогину. *Геол. журн.* 1968. № 6. С. 39—45.
- 34. Хаин В. Е. О главных направлениях в современных науках о Земле. Вестн. Рос. акад. наук. 2009. 79, № 1. С. 50-56.
- 35. Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Внеальпийская Европа и Западная Азия. Москва: Недра, 1977. 359 с.
- 36. Хаин В. Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. Москва: Недра, 1984. Том 1. 334 с.
- 37. Хаин В. Е. Тектоника континентов и океанов. Москва: Науч. мир, 2001. 606 с.
- 38. Хоменко В. И. Глубинная структура юго-западного края Восточно-Европейской платформы. Киев: Наук. думка, 1987. 140 с.
- 39. Хортов А. В., Шлезингер А. Е. Глубинное строение и особенности образования Черноморской топодепрессии в связи с перспективами нефтегазоносности. *Вести газовой науки*. 2015. № 2. С. 64—69.
- 40. Чекунов А. В. Структура земной коры и тектоника юга европейской части СССР. Киев: Наук.думка, 1972. 176 с.
- 41. Чекунов А. В. Проблемы Черноморской впадины. *Геофиз. журн.* 1987. **9**, № 4. С. 3—25.
- 42. Чебаненко И. И., Довгаль Ю. И., Знаменская Т. А. и др. *Тектоника Северного Причерноморья*. Отв. ред. И. И. Чебаненко. Киев: Наук. думка, 1988. 164 с.
- 43. Шатский Н. С. О прогибах Донецкого типа. Избранные труды. М.: Наука, 1964. Том 2. С. 544—553.
- 44. Шатский Н. С., Богданов А. А. О Международной тектонической карте Европы, масштаб 1: 2 500 000. *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1961. № 4. С. 3–25.
- 45. Штилле Г. Древнейшие направления в тектонике Европы. Избр. труды. Москва: Мир, 1964. С. 602-625.
- 46. Штёклин Дж. Тектоника Ирана. Геотектоника. 1966. № 1. С. 3–21.
- Шульц С.С. Планетарная трещиноватость (основные положения). Планетарная трещиноватость. Л.: ЛГУ, 1973. С. 5—37.
- Banks C. J., Robinson A. Mesozoic strike-slip back-arc basins of the western Black Sea region. Robinson A. G. (Ed.). Regional and Petroleum geology of the Black Sea and Surrounding Region. AAPG Memoir. 1997. 68. P. 53–62.
- 49. Barka A., Reilinger R. Active tectonics of the Eastern Mediterranean region deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Annali Di Geofisica*. 1997. **40**. P. 587–610.
- 50. Bogdanova S. V., Gorbatschev R., Garetsky R.G. Europe. East European Craton. *Encyclopedia of Geology. Elsevier*. 2005. **2**. P. 34–49.
- 51. Chebanenko I. I., Klochko V. P., Tokovenko V. S. The net of global fracturing of the Carpathian-Balkanian-Dinarian orogenic system. *Teon. журн.* 1998. No. 1–2. P. 9–13.
- 52. Dadlez R. Strike-slip movements in the Polish Lowlands. Geol. Quart. 1994. 38, No. 2. P. 307-318.
- 53. Diaconescu M., Craiu A., Toma-Danila D., Craiu G.M., Ghita C. Main active faults from the eastern part of Romania (Dobrogea and Black Sea). Part 1: Longitudinal fault system. *Romanian Repts. in Physics*. 2019. **71**, No.702. 18 p.
- 54. Dinu C., Wong H. K., T'ambrea D. Stratigraphic and tectonic syntheses of the Romanian Black Sea shelf and correlation with major land structures. *Bucharest Geosci. Forum.* 2002. Special Vol. 2. P. 101–117.
- Dinu C., Wong H. K., Tambrea D., Matenco L. Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophys.* 2005. 410. P. 417–435.
- 56. Georgiev G. Geology and Hydrocarbon Systems in the Western Black Sea. Turkish J. Earth Sci. 2012. 21. P. 723-754.

- 57. Gradinaru E. Jurassic sedimentary rocks and bimodal volcanics of the Cielari-Camena outcrop belt: evidence for a transtensile regime of the Peceneaga-Camena Fault. *St. Cerc. Geol. Geofiz. Geogr. (Geol.).* 1988. **33**. P. 97–121.
- 58. Hippolyte J.-C. Geodynamics of Dobrogea (Romania): new constraints on the evolution of the Tornquist-Teisseyre Line, the Black Sea and the Carpathians. *Tectonophys.* 2002. **357**. P. 33–53.
- 59. Mazur S., Krzywiec P., Malinowski M., Lewandowski M., Aleksandrowski P., Mikołajczak M. On the nature of the Teisseyre-Tornquist Zone. *Geol., Geophys. and Environment.* 2018. 44 (1). P. 17–30.
- 60. Munteanu I., Matenco L., Dinu C., Cloetingh S. Kinematics of back-arc inversion of the Western Black Sea Basin. *Tectonics*. 2011. **30**. 21 p.
- 61. Narkiewicz M., Maksym A., Malinowski M., et al. Transcurrent nature of the Teisseyre—Tornquist Zone in Central Europe: results of the POLCRUST-01 deep reflection seismic profile. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch).* 2014. **104** (3). P. 775–796.
- 62. Oaie G., Seghedi A., Radulescu V. Natural marine hazards in the Black Sea and the system of their monitoring and realtime warning. *Geo-Eco-Marina [e-journal]*. 2016. **22.** P. 5–28.
- 63. Pegrum R. M. The extension of the Tornquist Zone in the Norwegian North Sea. *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 1984. 64. P. 39–68.
- 64. Pharaoh T.C., Winchester J. A., Verniers J., Lassen A., Seghedi A. The Western Accretionary Margin of the East European Craton: an overview. *Geol. Soc.*, London, Memoirs. 2006. **32**. P. 291–311.
- 65. Poźaryski W. Poludniowo-zachodnia krawedz Fennosarmacii. Kwart. geol. 1957. 1/2, N 3/4. S. 383-424.
- Poźaryski W., Brochwicz-Lewiński W., Tomczyk H. O heterochronicznoo ci linii Teisseyre'a-Tornquista. Prz. Geol. 1982. 30 (11). P. 569–574.
- 67. Regional and Petroleum geology of the Black Sea and Surrounding Regions (A. G. Robinson). *AAPG Memoir*. **68.** 1997. 385 p.
- Robynson A. G., Rudat J. H., Banks C. J., Wyles R. L. F. Petroleum geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geol.*. 1996. 13. P. 195–223.
- 69. Săndulescu M. Geotectonics of Romania. Bucharest: Technical Publishing House, 1984. 450 p. (in Romanian).
- Sandulescu M., Visarion M. La structure des plate-formes situees dans l'avant-pays et au dessous des nappes du flysch des Carpathes orientale. *Stud. Teh. Econ. Geofiz.* 1988. 15. P. 61–70.
- Thybo H. Crustal structure and tectonic evolution of the Tornquist Fan region as revealed by geophysical methods. *Bull. Geol. Soc. of Denmark*. 2000. 46. P. 145–160.
- 72. Zielhui A., Nolet G. Deep Seismic Expression of an Ancient Plate Boundary in Europe. *Science. New Series.* 1994. **265**, No. 5168. P. 79–81.

Стаття надійшла до редакції 12.12.2019

REFERENCES

- 1. Anokhin V. M. (2006). Global Disjunctive Network of the Earth: *Structure, Origin, and Geological Implications*. St. Persburg: Nedra [in Russian].
- 2. Afanasenkov A. P., Nikishin A. M., Obukhov A. N. (2007). *Eastern Black Sea Basin: Geological* Structure *and Hydrocarbon Potential*. Moscow: Nauchnyy Mir [in Russian].
- 3. Bogdanov A. A. (1964). *East European Platform / Tectonics of Europe: Explained. app. to the Intern. tecton. map of Europe.* 1:2500000. Moscow: Nauka [in Russian].
- 4. Bush V. A. (1983). Systems of transcontinental lineaments of Eurasia. *Geotectonics*, **3**, 15–31 [in Russian].
- 5. Bush V. A. (1983). Eurasia Transcontinental Lineament Systems. *Space Information in Geol.* V. G. Trifonov, V. I. Makarov, Yu. L. Safonov, P. V. Florensky (Ed). Moscow: Nauka [in Russian].
- 6. Bush V. A. (1983). Transcontinental lineaments and problems of mobilism. *Geotectonics*, 4, 14–25 [in Russian].
- 7. Verkhovtsev V. G. (2010). The latest tectonics of the Western (Pre-Dobrudja) segment of the Scythian Plate and adjacent territories. *Geophys. J.*, **32** (3), 29–42 [in Russian].
- 8. Garetsky R. G., Teshke G. Yu. (1977). Dobrudja-Northern Sea and Sarmatian-Turan lineaments. *Orogenic stage of variscid development in Central Europe and the USSR*. Moscow: Nauka [in Russian].
- 9. Glushko V. V. (1968). Tectonics and oil and gas potential of the Carpathians and adjacent troughs. Moscow: Nedra [in Russian].
- 10. Goryachev A. V. (1986). Deep faults and structural heterogeneities of the Earth's crust. *Heterogeneity of the tectonosphere and development of the Earth's crust*. Moscow: Nedra [in Russian].
- 11. Guterh A., Matezhok R., Payhel J., Perchutz E. (1977). The structure of the earth's crust along the VII International Profile of the NHS in Poland. *The structure of the earth's crust and upper mantle according to seismic data*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
- 12. Zaika-Novatsky V. S., Chekunov A. V. (1970). The main features of the junction of the East European platform with the Galician folded region of Baikalides. *Soviet Geol.*, **12**, 3–15 [in Russian].

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

- Znosko E., Petrenko V. S., Chirvinskaya M. V. (1977). The main features of the tectonic structure of the western edge of the Russian plate and its surroundings. *Moscow Univer. Bull. Ser. Geol.*, 3, 21–30 [in Russian].
- 14. Bagrov N. V., Shnyukov E. F., Maslakov N. A., Shnyukova E. E., Pasynkov A. A., Glushchenko I. V., et al. (2012). Map of the bottom topography of the Black and Azov Seas 1: 1250000. Simferopol: Department of Marine Geol. and Sedimentary Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine, Tauride National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, SIC "Technologies for Sustainable Development" TNU
- 15. Catterfeld G. N., Charushin G. V. (1970). Global Fracturing of the Earth and Other Planets. *Geotectonics*, **6**, 3–12 [in Russian].
- 16. Krasheninnikova O. V. (1960). Riphean deposits of the Ukrainian SSR and the conditions for their formation. *International Geological Congress, XXI session. Late Precambrian and Cambrian stratigraphy (Repts. of Soviet geologists)*. Moscow: Academy of Sciences of the USSR [in Russian].
- 17. Mezhelovsky N. V. (1987). (Eds). Cosmotectonic map of the European countries members of the CMEA and the SFRY. 1: 1 000 000. CMEA
- 18. Lomakin I. E., Pokalyuk V. V., Kochelab V. V., Shuraev I. N. (2018). The Azov-Adriatic megalineament a trans-regional zone of conjugated deep faults in the south of Europe. *Geol. and minerals of the oceans*, **2**, 29–47 [in Russian].
- 19. Hain V. E., Leonov Yu. G (Eds). (1996). International tectonic map of Europe. 1: 5 000 000. Third edition. UNESCO, RAS
- 20. Mokryak I. M. (2014). On the question of the position of the western border of the Eastern European Platform. *Mineral resources of Ukraine*, **2**, 15–19 [in Ukrainian].
- 21. Trifonov V. G., Dodonov A. E., Bachmanov D. M., Ivanova T. P., Karakhanyan A. S., et al. (2012). *Neotectonics, modern geodynamics and seismic hazard of Syria*. Proc. *Geol.* Institute. Vol. 598. Moscow: GEOS [in Russian].
- 22. Petrenko V. S., Pozharisky V. (1972). The problem of the tectonic structure of the southwestern margin of the East European platform. *News of higher educational institutions. Ser. Geol. and exploration*, **4**, 17–24 [in Russian].
- Pokalyuk V. V., Lomakin I. E., Shuraev I. N. (2018). Tectonic-lineament zones of East-north-east trending as constituent element of a rhegmatogenic fault network of the Balkan-Black Sea region. *Ukr. J. Remote Sensing of the Earth*, 18, 40–52 [in Russian].
- Rasvetsaev L. M., Tveritinova T. Yu. (2016). Earth rotation and planetary zones of cleavage, compression, and tension. Fourth Tectonophysical Conference. Section 5. General theoretical issues of tectonophysics and problems of geodynamics. Moscow: IPE RAS. V. 2. P. 545–552 [in Russian].
- 25. Rasvetsaev L. M. (1980). Regular structural drawing of the earth's surface and its dynamic interpretation. *Problems of global correlation of geological phenomena*. Moscow: Nauka, 145–216 [in Russian].
- 26. Rasvetsaev L. M. (1987). Identification of paragenetic families of tectonic disjunctives as a method of paleogeomechanical analysis of stress fields and deformations of the earth's crust. *Fields of stresses and deformations in the earth's crust*. Moscow : Nauka, 171–181 [in Russian].
- 27. Skaryatin V. D., Atanasyan S. V. (1976). Linear and ring structures of some regions of Eurasia. *News of higher educational institutions. Geol. and exploration*, **11**, 135–148 [in Russian].
- 28. Tveritinova T. Yu. (2013). Lineaments as a reflection of the structural framework of the lithosphere (Lineaments faults or phantoms?). *Electronic scientific publication Almanac Space and Time*. Vol. 4, 1, Special issue System «Planet Earth».[in Russian].
- 29. Mezhelovsky N. V. (Ch. Ed.) (1987). Tectonic structures of central and south-eastern Europe based on satellite imagery. Explanatory note to the Cosmotectonic map of the European CMEA and SFRY member countries at a scale of 1: 1 000 000. CMEA Secretariat. [in Russian].
- 30. Trifonov V. G. (1999). Neotectonics of Eurasia. Moscow: Nauchnyy mir [in Russian].
- Trifonov V. G., Soboleva O. V., Trifonov R. V., Vostrikov G. A. (2002). Modern geodynamics of the Alpine-Himalayan collision belt. Moscow : GEOS. (Works GIN RAS; issue 541) [in Russian].
- 32. Tugolesov D. A., Gorshkov A. S., Meissner L. B., et al. (1985). *Tectonics of Meso-Cenozoic sediments of the Black Sea basin*. Moscow: Nedra [in Russian].
- Utrobin V. M., Vitryk S. P. (1968). The role of deep faults in the formation of the Precarpathian marginal deflection. *Geol. J.*, 6, 39–45 [in Ukrainian].
- 34. Hain V. E. (2009). On the main directions in modern Earth sciences. Bull. Russian Acad. of Sci., 79 (1), 50-56 [in Russian].
- 35. Hain V. E. (1977). Regional geotectonics. Extra-Alpine Europe and West Asia. Moscow: Nedra [in Russian].
- 36. Hain V. E. (1984). Regional geotectonics. Alpine Mediterranean belt. Moscow: Nedra. Vol. 1 [in Russian].
- 37. Hain V. E. (2001). Tectonics of continents and oceans. Moscow: Nauchnyy mir [in Russian].
- 38. Khomenko V. I. (1987). *The deep structure of the southwestern edge of the East European platform*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].

- 39. Khortov A. V., Schlesinger A. E. (2015). The deep structure and features of the formation of the Black Sea topodepression in connection with the prospects of oil and gas. *News of gas science*, **2**, 64–69 [in Russian].
- 40. Chekunov A. V. (1972). *The structure of the earth's crust and tectonics of the south of the European part of the USSR*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
- 41. Chekunov A. V. (1987). Problems of the Black Sea Depression. Geofiz. J., 9 (4), 3–25 [in Russian].
- 42. Chebanenko I. I., Dovgal Yu. I., Znamenskaya T. A., et al. (1988). *Tectonics of the Northern Black Sea region*. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
- 43. Shatsky N. S. (1964). On the deflections of the Donetsk type. Selected Works. Moscow: Nauka. Vol. 2, 544-553 [in Russian].
- 44. Shatsky N.S., Bogdanov A. A. (1961). On the International Tectonic Map of Europe, scale 1:2 500 000. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences, Ser. Geol.*, **4**, 3–25 [in Russian].
- 45. Stille G. (1964). Favorites Proceedings. Moscow: Mir, 602-625 [in Russian].
- 46. Shtoklin J. (1966). Tectonics of Iran. Geotectonics, 1, 3–21 [in Russian].
- Schultz S. S. (1973). Planetary Fracturing (Fundamentals). *Planetary Fracturing*. Leningrad: Leningrad State University, 5–37 [in Russian].
- Banks C. J., Robinson A. G. (1997). Mesozoic strike-slip back-arc basins of the western Black Sea region. Robinson A. G. (Ed.), Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region. AAPG Mem. 68, 53–62.
- 49. Barka A., Reilinger R. (1997). Active tectonics of the Eastern Mediterranean region: Deduced from GPS, neotectonic and seismicity data. *Ann. Geofis.*, **40**, 587–610.
- 50. Bogdanova S. V., Gorbatschev R., Garetsky R. G. (2005). Europe. East European Craton. *Encyclopedia of Geol. Elsevier.* 2, 34–49.
- 51. Chebanenko I. I., Klochko V. P., Tokovenko V. S. (1998). The net of global fracturing of the Carpathian-Balkanian-Dinarian orogenic system. *Geol. J.*, No. 1-2, 9–13.
- 52. Dadlez R. (1994). Strike-slip movements in the Polish Lowlands. Geol. Quart., 38 (2), 307-318.
- Diaconescu M., Craiu A., Toma-Danila D., Craiu G. M., Ghita C. (2019). Main active faults from the eastern part of Romania (Dobrogea and Black Sea). Part 1: Longitudinal fault system. *Romanian Repts. in Phys.*, **71** (702), 18 p.
- 54. Dinu C., Wong H. K., Tambrea D. (2002). Stratigraphic and tectonic syntheses of the Romanian Black Sea shelf and correlation with major land structures. *Bucharest Geosci. Forum. Spec.*, **2**, 101–117.
- Dinu C., Wong H. K., Tambrea D., Matenco L. (2005). Stratigraphic and structural characteristics of the Romanian Black Sea shelf. *Tectonophys.*, 410, 417–435.
- 56. Georgiev G. (2012). Geology and Hydrocarbon Systems in the Western Black Sea. Turkish J. Earth Sci., 21, 723-754.
- 57. Gradinaru E. (1988). Jurassic sedimentary rocks and bimodal volcanics of the Cielari-Camena outcrop belt: evidence for a transtensile regime of the Peceneaga-Camena Fault. *St. Cerc. Geol. Geofiz. Geogr. (Geol.)*, **33**, 97–121.
- Hippolyte J.-C. (2002). Geodynamics of Dobrogea (Romania): new constraints on the evolution of the Tornquist-Teisseyre Line, the Black Sea and the Carpathians. *Tectonophys.*, 357, 33–53.
- Mazur S., Krzywiec P., Malinowski M., Lewandowski M., Aleksandrowski P., Mikołajczak M. (2018). On the nature of the Teisseyre-Tornquist Zone. *Geol., Geophys. and Environment*, 44 (1), 17–30.
- 60. Munteanu I., Matenco L., Dinu C., Cloetingh S. (2011). Kinematics of back-arc inversion of the Western Black Sea Basin. *Tectonics*, **30**, 21 p.
- 61. Narkiewicz M., Maksym A., Malinowski M., et al. (2014). Transcurrent nature of the Teisseyre—Tornquist Zone in Central Europe: results of the POLCRUST-01 deep reflection seismic profile. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch)*, **104** (3), 775–796.
- 62. Oaie G., Seghedi A., Radulescu V. (2016). Natural marine hazards in the Black Sea and the system of their monitoring and real-time warning. *Geo-Eco-Marina [e-journal]*, **22**, 5–28.
- 63. Pegrum R. M. (1984). The extension of the Tornquist Zone in the Norwegian North Sea. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **64**, 39–68.
- 64. Pharaoh T. C., Winchester J. A., Verniers J., Lassen A., Seghedi A. (2006). The Western Accretionary Margin of the East European Craton: an overview. *Geol. Soc., London, Memoirs*, **32**, 291–311.
- 65. Poźaryski W. (1957). Południowo-zachodnia krawedz Fennosarmacii. Kwart. Geol., 1/2, No. 3/4, 383–424 [in Polish].
- 66. Poźaryski W., Brochwicz-Lewiński W., Tomczyk H. (1982). O heterochronicznoości linii Teisseyre'a-Tornquista. *Prz. Geol.*, 30 (11), 569–574 [in Polish].
- Robinson A. G. (Ed). (1997). Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Regions. *AAPG Memoir*, 68, 385 p.
- 68. Robynson A. G., Rudat J. H., Banks C. J., Wyles R. L. F. (1996). Petroleum Geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geol.*, **13**, 195–223.
- 69. Săndulescu M. (1984). Geotectonics of Romania. Bucharest: Technical Publishing House [in Romanian].

- Sandulescu M., Visarion M. (1988). La structure des plate-formes situees dans l'avant-pays et au dessous des nappes du flysch des Carpathes orientales. *Stud. Teh. Econ. Geofiz.*, 15, 61–70 [in Romanian].
- Thybo H. (2000). Crustal structure and tectonic evolution of the Tornquist Fan region as revealed by geophysical methods. *Bull. of the Geol. Soc. of Denmark*, 46, 145–160.
- 72. Zielhui A., Nolet G. (1994). Deep Seismic Expression of an Ancient Plate Boundary in Europe. *Science, New Series*, **265** (5168), 79–81.

Received 12.12.2019

V. V. Pokalyuk¹, Leading Researcher, Dr. Sci. in Geology

E-mail: pvskan@ukr.net

I. E. Lomakin², Head of the Department of Tectonics and Marine Geoecology, Dr. Sci. in Geology

V. G. Verkhovtsev¹, Head of the Department of Special Metallogeny, Dr. Sci. in Geology

¹ State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine" 34a Akademika Palladina Ave., Kviv-142, 03142 Ukraine

2 State Stat

² State Scientific Institution "Center for Problems of Marine *Geology*,

geoecology and sedimentary ore formation National Academy of Sciences of Ukraine"

55b Gonchara st., Kyiv-601, 01601 Ukraine

BALTIC-IRANIAN SUPER LINEAMENT — LONG-LIVED TRANS-EURASIAN BELT OF DISLOCATIONS AND PLANETARY MEGAFRACTURES

Information on fault tectonics and the deep structure of the global trans-Eurasian belt of dislocations and planetary megafractures (Baltic-Iranian Super Lineament) is generalized based on the analysis of literary, geological and geophysical, cartographic, cosmographic materials, including the results of tectonic lineaments interpretation of cosmo-images of the Earth's surface. The features of its distribution and segmentation are clarified. This Super Lineament is the trans-Eurasian structure of a planetary rank — an integral part of the regularly spatially oriented ancient reghmatic fault net of Eurasia, formed at the early stages of the formation of the rigid earth crust under the influence of global stresses associated with the factor of rotation of the Earth. The long-lived nature of the belt (the Upper Proterozoic — Cenozoic) and its quasi-stationary position throughout its formation history, as well as the absence of large-scale, hundreds of kilometers, of shear displacements along it and at intersections with transverse tectolineament belts of a similar rank indicate the low probability of the plate-tectonic convergence model of Afro-Arabia and Eurasia. The destruction model of the once united Afro-Eurasian continent in a potentially shear field of relatively low amplitude (on a planetary scale) dislocations is preferable. The geodynamic mode of formation and development of the belt as a whole cannot be described by any one type — riftogenic, or collisional ones. Regional and supra-regional zones of extension (riftogenic zones) and compression (collision) alternate in it periodically. It shows the global nature of the belt, the union of different geodynamic regimes in it, as well as the wave character and hierarchy of the tectonic process.

Keywords: decryption of cosmo-images, tectonics, geodynamics, lineament, Baltic-Iranian tectolineament belt, Teisseyre-Tornquist Zone, reghmatic fault net, planetary mega-fractures.
Астрономія й астрофізика

Astronomy and Astrophysics

https://doi.org/10.15407/knit2020.05.073 УДК 523.43 (629.78, 902.03)

 A. С. БІЛИК^{1,2,3}, доц., сертифікований інженер, магістр, канд. техн. наук E-mail: artem.bilyk@gmail.com
I. В. ГРЕБЕНЄВА¹, магістр архітектури, бакалавр інженерії E-mail: irina.hrebenieva@gmail.com

 ¹ Київський національний університет будівництва і архітектури Повітрофлотський просп. 31, Київ, Україна, 03680
² Український науково-дослідний Центр вивчення аномалій «Зонд» (УНДЦА «Зонд») при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» пр-т Перемоги 37, Київ, Україна, 03056
³ Аерокосмічне товариство України вул. Малевича 11, Київ, Україна, 03680

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЄКТУВАННЯ СПОРУД В УМОВАХ МАРСА

Розглядаються основні фізичні параметри та кліматичні особливості Марса як можливого місця будівництва першої стаціонарної дослідницької місії. На основі цього вибудовуються фактори впливу на будівлі колонії, які в свою чергу є основним підгрунтям для проєктування на Марсі. Також у роботі проведено аналіз відомих проєктних пропозицій споруд на Марсі та ефективних засобів їхнього захисту від негативного впливу середовища, прийнято до уваги досвід будівництва у складних умовах на Землі. Детально проаналізовано дані та визначено параметри для вибору місця розташування комплексу, серед яких склад ґрунту, кліматичні показники, місцевість, рівень космічного випромінювання, місця виявлення коливання метану, зона екватора, перспективні місця для дослідження та місця успішної посадки минулих місій. Таким чином, на основі даних обґрунтовано вибір місця розташування комплексу, що є основним результуючим фактором для будівництва. Важливим аспектом також є визначення етапів колонізації планети та місця колонії у системі будівництва. Розроблена проєктна пропозиція стосується другого етапу колонізації планети. Колонія — це квазізамкнена система, яка має свій «життєвий цикл» з використанням лише власних і наявних на планеті ресурсів. За допомогою параметрів, які впливають на життєздатність проєкту, можна осягнути повний «життєвий цикл» колонії. У роботі також запропоновано ієрархічну систему функцій комплексу дослідницької місії, яка включає п'ять основних функцій: дослідницьку, транспортну, житлову, виробничу та функцію переробки. На основі ісрархії розроблено функціональні параметри приміщень та показано зв'язки між ними. Загалом можна виокремити три блоки: житловий, науковий та технічно-складський, які органічно пов'язані між собою. Функція максимально оптимізована під потреби людини у марсіанських умовах та розрахована на інтеграцію штучного інтелекту у колонію. Однак задачі, що розглядаються, є лише частиною широкого кола технічних, транспортних, фінансових та інших задач, які становлять комплексну проблематику забудови на Марсі.

Ключові слова: Марс, кліматичні особливості Марса, дослідницька місія, колонізація, вибір місця будівництва, ієрархія функції, функціональна схема.

1. ВСТУП

Пізнання навколишнього світу є однією із функцій людини і природно не обмежується тільки нашою планетою. Тому один із найважливіших кроків у космічному майбутньому людства — це заснування дослідницьких місій на інших пла-

Цитування: Білик А. С., Гребенєва І. В. Особливості проєктування споруд в умовах Марса. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 73—89. https://doi.org/10.15407/knit2020.05.073 нетах [2, 7, 8, 10]. Необхідність цього зумовлена можливістю розширення меж досліджень у процесі становлення стійкої цивілізації і захисту її надбань від потенційної загрози знищення. Дослідження та аналіз умов на планетах і їхніх супутниках у Сонячній системі показали, що перебування людини на них без спеціальних засобів, підготовки, споруд — неможливе [5]. Серед найбільш сприятливих місць Марс займає провідну позицію через схожість із земними фізичних та кліматичних особливостей планети, таких як полярні шапки, сезонні зміни, час доби, наявність погодних умов і відносно невелику відстань до Землі [5]. Найбільш актуальними задачами перспективної місії на Марсі видаються біологічні, геологічні, палеонтологічні та, можливо, археологічні дослідження. Незважаючи на схожість із Землею, Марс є достатньо агресивним середовищем для будівництва та перебування людей. Дана робота розглядає архітектурно-функціональні особливості проєктування та зведення споруд стаціонарної дослідницької колонії на Mapci.

2. ЗАГАЛЬНІ ФІЗИЧНІ, КЛІМАТИЧНІ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТИ

Марс значно менший за Землю, в результаті чого прискорення вільного падіння на його екваторі дорівнює 3.711 м/с² (0.378 земного) [29]. З одного боку, невелика гравітація спрощує зліт космічних апаратів із поверхні планети та є перевагою при будівництві, з іншого — тривалий вплив низької гравітації на живі організми наразі досліджено мало. Безумовно, це вплине і на майбутні покоління, для яких Марс буде рідною планетою. Їхні біологічні показники будуть дещо змінені і відповідно архітектура повинна це враховувати, пристосовуючись під нові потреби «марсіан». Важливо також відмітити радіацію, природний рівень якої на Марсі у 50 разів вищий, ніж на Землі, через відсутність магнітного поля. Це менше небезпечного рівня для людини [5], проте тривалий радіаційний вплив на людину при постійному перебуванні на поверхні планети або підвищення рівня жорсткого випромінювання під час спалахів на Сонці потребує наразі додаткових досліджень. Розв'язками

проблем радіаційного захисту можуть стати створення штучного магнітного поля чи заглиблення споруд під поверхню планети.

Середньорічна температура на Марсі сягає -63 °С [29], а загальний температурний діапазон на планеті становить -153...+35 °С [12]. Температура поверхні протягом доби істотно змінюється. Наприклад, у південній півкулі на широті 50° температура в середині осені змінюється від -18 °С (опівдні) до -63 °С (увечері) [12]. Температурний режим — один із найважливіших показників при проєктуванні споруд, що впливає на вибір матеріалів та внутрішніх підтримувальних систем, і є вагомим параметром при розрахунку конструкцій. Різкі перепади температури можуть спричинити деформації конструкцій та швидку зношуваність матеріалів. Тому матеріали для будівництва повинні бути ретельно підібрані та максимально ефективно відповідати вимогам. Поверхня Марса має дуже низьку теплову інерцію — вона швидко нагрівається, коли на неї світить Сонце. Типові щоденні коливання температури для зон, далеких від полярних областей, становлять до 170 °С [12]. На Землі вітри утворюються у районах, де раптово змінюється теплова інерція, наприклад від моря до суші. На Марсі немає морів, але є ділянки, де змінюється теплова інерція ґрунту, що призводить до ранкових та вечірніх вітрів, схожих на морські вітри на Землі. У високих широтах переважають райони високого і низького тиску, які називаються хвилями бароклінічного тиску, а на низьких широтах – циркуляція Хедлі, які відповідають за утворення вітрів. Атмосферний тиск на Марсі в середньому 600 Па (6 мбар), або близько 0.6 % від середнього тиску на рівні моря Землі (101.3 кПа = 1.013 бар) [29]. У всіх приміщеннях, де перебуває людина, має підтримуватися стабільна екосистема, тобто необхідний тиск, вологісно-тепловий режим та якісний повітрообмін. Отже, низький атмосферний тиск на поверхні зумовлює необхідність встановлення системи підтримки потрібного для людини тиску (у межах 0.7...1 бар) та врахування різниці тиску при проєктуванні споруд, пристроїв і машин. Через те що різниця тиску досить суттєва (78.860 кПа), принцип роботи конструкцій дещо відрізнятиметься від земних.

Атмосфера на Марсі складається з вуглекислого газу (95.9 %), азоту (1.9 %), аргону (2 %) та містить сліди кисню й води [29]. Отже герметизація приміщень необхідна не тільки через різницю тисків, а й через несприятливий склад атмосфери.

В умовах сухості та малого прискорення вільного падіння пил, що підіймається вітрами, в основному залишається в атмосфері довше, ніж на Землі, оскільки опади практично відсутні (крім снігу СО₂). Велика кількість у атмосфері мікрочастинок пилу діаметром приблизно 1.5 нм надають небу рудувато-коричневого відтінку. На Марсі утворюються величезні пилові шторми, які можуть швидко поширюватись на всю поверхню планети. Результати аналізу показують, що під час штормів майже 99 % сонячного світла не досягає поверхні, а це ускладнює видобуток сонячної енергії [22]. Тому на першому етапі функціонування марсіанської місії можливе використання ядерної енергії з поступовим переходом на вітрову, геотермальну та інші джерела енергії. Звісно, сонячні панелі є достатньо потужним джерелом енергії, і більшість часу будуть працювати поряд із атомним реактором, однак фактори ризику занадто великі, щоб використовувати тільки їх.

На основі даних зондування з орбіти, аналізу на поверхні планети та метеоритів, які долетіли до Землі з Марса, вважається, що найбільш поширеними хімічними елементами у марсіанській корі, крім кремнію та кисню, є залізо, магній, алюміній, кальцій і калій [11]. Ці елементи є основними компонентами мінералів, що містять магматичні породи. Менш поширені елементи титан, хром, марганець, сірка, фосфор, натрій та хлор є важливими складовими багатьох допоміжних мінералів у гірських породах та вторинних мінералах у пилу і ґрунті. Водень наявний у вигляді водяного льоду та в гідратованих мінералах. Вуглець — у вигляді вуглекислого газу в атмосфері, а іноді як сухий лід на полюсах. Невизначена кількість вуглецю також зберігається у карбонатах [11]. У 2012 р. марсохід «Curiosity» здійснив перший рентгенодифракційний аналіз марсіанського ґрунту, який показав наявність кількох мінералів, включаючи польовий шпат,

піроксени та олівін. Таким чином, можна припустити, що марсіанський ґрунт у зразку подібний до «вивітрюваних базальтових ґрунтів» Гавайських вулканів [11]. Різноманіття хімічних елементів дає можливість для виготовлення матеріалів, що є важливим чинником для розвитку колонії. Вода — незамінний компонент для систем колонії. Вода не може бути на поверхні Марса у рідкому стані через низький атмосферний тиск, хіба що на короткий час у низинах, але на обох полюсах є крига, яка складається в основному із (70 %) водяного льоду. Також поклади водяного льоду є у поверхневому шарі ґрунту. За допомогою космічного телескопа «Габбл» були виявлені перехідні явища поляризації, відомі як «хмари». Вони оптично тонкі, але сильно поляризовані, і їхнє походження може бути пов'язане з процесами конденсації атмосферного льоду [14, 24]. Отже, загальні фізичні, кліматичні та гідрогеологічні характеристики показують, як середовище впливатиме на колонію. Всі зазначені фактори діють на кожному рівні проєктування, і є вагомими для вироблення рішень із будівництва та інтеграції колонії у навколишню екосистему планети.

3. АНАЛІЗ НАЯВНИХ ПРОПОЗИЦІЙ СПОРУД На Марсі та практика будівництва У Складних умовах на землі

Моделювання умов будівництва і формування середовища для життя на Марсі вже неодноразово ставали предметом проєктних пошуків. Істотний вплив у цьому напрямку був зроблений НАСА. У 2015 р. космічне агентство оголосило конкурс «Habitat Challenge», який складався з трьох фаз та передбачав розробку ефективного середовища проживання для екіпажу з чотирьох астронавтів з використанням методів 3D-друку. Представлені проєкти оцінювалися за їхньою інноваційністю, раціональністю архітектурного вирішення та рівнем деталізації ВІМ-моделювання. Тобто, проробка ВІМмоделі будівлі як системи, яка складається з архітектурних рішень, конструкцій, технологічних аспектів, різних систем (вентиляції, опалення і т. п.) як на Землі, так і на Марсі є важливим чинником проєктування. Проєкт «Ісе House» від компанії «Clouds Architecture Office» та «SEArch» переміг у першій фазі конкурсу (рис. 1, а). Як будівельний матеріал у проєкті запропоновано лід з поверхні Марса, який, окрім доступності, виступає також як протирадіаційне укриття. Житлові приміщення у внутрішній частині споруди захищені приміщеннями для вирощування рослин [13]. Відома компанія «Foster+Partners» та «Branch Technology» стали переможцями другої фази конкурсу (рис. 1, δ). Їхня концепція передбачає роботу трьох різних видів роботів на поверхні Марса: ті, які копатимуть ґрунт для будівництва, ті, які обробляють реголіт для створення шаруватих стін, і ті, які використовують мікрохвилі для розплавлення і з'єднання матеріалу. Реголіт створює постійний щит для поселення від випромінювань і зовнішніх температур. Будівництво проходить в декілька етапів: спочатку напівавтономні роботи формують 1.5-метровий котлован, а потім потік надувних модулів збирається у котловані, щоб сформувати ядро поселення [17]. У третій фазі конкурсу переміг проєкт MARSHA від «AI SpaceFactory» (рис. 2, *a*). За даними команди MARSHA презентує радикальний відхід від попередніх схем проживання, який базується на куполах або структурах під землею. Форма споруд оптимізована під атмосферний тиск і зовнішні навантаження, вона також забезпечує більший коефіцієнт корисної площі до об'єму [27]. Провідну позицію у розвитку колонізації Марса займає американська компанія «SpaceX», але її розробки головним чином орієнтовані на транспортну систему, а проєкт поселення — допоки на концептуальному рівні. Загалом у плани «SpaceХ» входить будівництво міста на Марсі, починаючи із базової інфраструктури: станції з видобутку палива, електростанції та теплиці для вирощування їжі. Споруди колонії є модульними, що надає швидкості та гнучкості для будівництва. Згідно з планом компанії у недалекому майбутньому планується відправка близько мільйона людей на Марс із вартістю квитка в один кінець на рівні 200 000 доларів США. На думку Ілона Маска, голови «SpaceX», ця ціна цілком досяжна, якщо врахувати гіпотетичний потенціал багаторазовості розробленого компанією ракети-носія «Big Falcon Rocket» [9].

Найсуворіші умови на Землі для проведення натурних експериментів все ж далекі від найбільш сприятливих умов на Марсі. Земна Антарктида досить схожа на умови Марса, хоча і має менші перепади і мінімуми температур. Тому проєктування і будівництво на цьому континенті може дати максимально корисний досвід для спорудження місії на Марсі. Допоки у Антарктиді немає постійного поселення людей, а є тільки дослідницькі станції, на яких протягом певного часу перебувають люди, серед них станція НАН України «Академік Вернадський». Варто відзначити «Halley VI» (Велика Британія) — першу у світі дослідницьку модульну станцію, здатну до переміщення (рис. 2, б). Вона складається із семи взаємопов'язаних розташованих по прямій лінії модулів, у яких розміщено спальні, лабораторії, кабінети та енергетичний блок. У центрі просторий двоповерховий червоний модуль із простором для відпочинку [23].

Також є декілька проєктів, в яких імітуються марсіанські умови. Одним із них є дослідницька станція «Mars Desert» від «Mars Society» (рис. 3, *a*). Станцію побудовано біля міста Ханксвіл у штаті Юта (США) в 2000-х роках і її відвідують невеликими групами від одного тижня до трьох місяців, щоб провадити наукові дослідження. До комплексу входять двоповерховий житловий будинок «Hab», теплиця «GreenHab», сонячна обсерваторія «Musk», робототехнічна обсерваторія, інженерна установка RAM і наукова лабораторія «ScienceDome». Тунелі між усіма будівлями, за винятком роботизованої обсерваторії, дозволяють екіпажу переходити між будівлями без скафандра, поки вони перебувають у симуляції [16].

Проєкт «Mars Science City» (рис. 3, δ) — це ще один крок у напрямку дослідження марсіанських умов на Землі. Уряд Об'єднаних Арабських Еміратів запросив відомого архітектора Б'ярке Інгельса для будівництва прототипу міста Марса у пустелі. Сформований пов'язаними куполами, «Mars Science City» буде мати кілька лабораторій для вирощування продуктів і сільськогосподарських досліджень, а також споруд для видобутку енергії та води [19].

Проаналізувавши наявні проєктні пропозиції споруд на Марсі, можна звернути увагу на до-



Рис. 1: a -проєкт Ісе House від Clouds Architecture Office та SEArch [26], $\delta -$ проєкт від Foster + Partners та Branch Technology [17]



Рис. 2: *а* — проєкт MARSHA від AI SpaceFactory [27], *б* — станція Halley VI в Антарктиді [23]



Рис. 3: *а* — дослідницька станція Mars Desert від Mars Society [16], *б* — Проєкт Mars Science City від BIG [19] *ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5*

сить продумані рішення у питаннях захисту від агресивного марсіанського середовища, однак деякі аспекти потребують подальшої проробки. Колонія має функціонувати як квазіавтономна система, навіть на рівні концептуальної пропозиції, і це порушує питання функціональних зв'язків та відповідних технологічних рішень. Також важливим фактором є дослідницька місія як головний чинник архітектурно-планувальних рішень. Варіанти із адаптивними модульними конструкціями є економічними, конструктивно живучими та функціонально гнучкими і можуть бути використані як основний принцип будівництва на Марсі, хоча і потребують значної індустріальності при виготовленні та універсалізації для окремих функціональних блоків.

4. ВИРОБЛЕННЯ ПРИНЦИПІВ ВИБОРУ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ КОЛОНІЇ

Станції передбачають тимчасове перебування і повну або часткову залежність від Землі, тоді як колонія для дослідницької місії має бути повністю самодостатнім, стійким утворенням зі сталим розвитком.

Вибір правильного місця — важливий крок для успішного створення першої місії на Марсі. Від цього залежить майбутній розвиток та функціонування колонії. Оскільки транспортування із Землі є економічно невигідним і довготривалим, необхідно навчитися створювати матеріали, конструкції, прилади тощо із наявних ресурсів планети та вторсировини. Отже, пріоритетною задачею є вибір місця із необхідними умовами та ресурсами.

Щоб проаналізувати наявні виробничі ресурси планети і місцеві кліматичні та ґрунтові умови зі зміною їх у часі, були використані глобальні моделі Марса у вигляді карт із бази даних «Mars Climate Database v5.3» [15]. На основі аналізу розглянуто такі параметри:

- 1. Кліматичні показники і атмосфера
- температура атмосфери нижнього шару
- варіації температури
- атмосферний тиск
- середня швидкість вітру
- видима оптична глибина
- 2. Грунт та поверхня

- щільність ґрунту
- граничний тиск
- температура поверхні
- лід H₂O у ґрунті
- лід CO₂ у ґрунті
- 3. Елементарний склад атмосфери
- вуглекислий газ
- аргон
- азот
- чадний газ
- 030H
- 4. Випромінювання
- термічне інфрачервоне (потік до поверхні)
- термічне інфрачервоне (потік до космосу)
- сонячне жорстке (потік до поверхні)
- сонячне жорстке (потік відбитий у космос)
- інші типи випромінювань

Також, використовуючи дані карт Європейського космічного агентства (ЄКА) [18], було проаналізовано рельєф планети та поширення таких речовин, як гідрати, олівін, піроксен та оксид заліза, що є одними зі складових ресурсної бази в умовах Марса.

Рельєф значною мірою впливає на вибір місця спорудження, оскільки задає архітектуру та впливає на вибір конструкцій. Найкращим варіантом для будівництва буде скоріш рівнина, оскільки при роботизованому будівництві це економічно вигідний, і з технологічної точки зору простіший варіант з малими ризиками.

Грунтуючись на дослідженнях вибору місця для гіпотетичної колонії, було узагальнено відомі та виявлено нові додаткові параметри, орієнтовані на певні цілі. Зокрема, такі дослідження проводилися вченими В. Вамелінг і Л. Шуг з університету Вагенінгена [28], які визначили найбільш сприятливі місця розташування колонії на Марсі, орієнтуючись загалом на потребу вирощування рослин. Вирощування продовольчих культур буде одним із ключових завдань для місії. Незважаючи на те що спочатку рослини будуть вирощуватися у приміщеннях за допомогою аеропоніки, для майбутньої адаптації до поверхні планети необхідно проводити і дослідження із висадки рослин на марсіанський реголіт. Для аеропоніки також необхідні мінерали та вода, яка є у ґрунті у вигляді льоду. З урахуванням на-



Рис. 4. Карта оціночної градації посадкових майданчиків на Марсі [28]

ведених факторів було отримано карту найбільш придатних місць Марса (рис. 4) [28]. Сині кольори на карті вказують на високий потенціал місць будівництва, червоні кольори — менш придатні місця. Обидва полюси і рівнина Еллада не розглядались через відсутність даних. Для оцінки раціональних місць посадки на Марсі використано декілька марсіанських карт за різними показниками [28]:

1. Склад ґрунту (вміст реголіту, льоду, мінералів, важких металів, калію, хлориду, заліза і кремнію).

- 2. Рівень радіації.
- 3. Кліматичні показники.
- 4. Місцевість (тип рельєфу, перепади висот).
- 5. Рівень космічного випромінювання.

Карти були об'єднані, і розраховано середній бал по різних ділянках, що за допомогою шкали дало змогу визначити градацію місць посадки [28]. В даному дослідженні ми включили додаткові параметри:

- місця виявлення коливання метану та кисню;
- зона екватора;
- перспективні місця для дослідження;
- місця успішної посадки минулих місій.

Місця виявлення коливання концентрації метану на Марсі, виявлені нещодавно, становлять інтерес для пошуку марсіанського життя, яке може існувати під поверхнею [21, 25]. Основні місця викиду метану в атмосферу були позначені на карті зеленими позначками (рис. 5). Концентрацію метану у кожному місці приведено у частинках на мільярд (ppb). Також останні дослідження вказують на коливання рівня кисню у кратері Гейла [26] (рис. 5). Рівень кисню не відповідає тим же сезонним зразкам, що й інші гази у кратері, зростаючи значно вище, ніж прогнозувалось навесні та влітку, і опускається нижче очікуваного рівня взимку. Причина зміни кількості кисню так само, як і коливання метану, поки що залишається невизначеною.

Зона екватора зменшує витрати для пуску космічних кораблів через меншу силу тяжіння. У подальшому економічна модель колонії передбачає торгівельні та туристичні можливості, видобуток ресурсів як з поверхні, так і з астероідів тощо, тому космічна транспортна система є важливою частиною колонізації.

Також суттєвим показником для розташування колонії є близькість до місць можливих



Рис. 5. Карта з місцями виявлення метану та кисню



Рис. 6. Карта розташування найбільш значущих аномалій на поверхні Марса



Рис. 7. Місця вдалих посадок дослідницьких апаратів



Рис. 8. Карта найбільш оптимальних місць для розташування колонії і пропонована локація

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

досліджень. Як відомо, вченими та аматорами були виявлені безліч аномалій, які можуть свідчити про невідому тектонічну активність, явища у атмосфері, наявність життя або сліди його діяльності у минулому тощо [10]. Найбільш значущі аномалії винесено нами на загальну мапу (рис. 6). Місця посадки минулих вдалих місій були позначені на рис. 7. Ці місця найбільш досліджені і мають достатньо відомі показники клімату, мікрорельєфу, ґрунтових умов тощо, що знижує ризики для будівництва і експлуатації колонії. Отже, після аналізу даних з наведених вище мап було відмічено три найраціональніші місця для розташування колонії, з-поміж яких експерти обрали найбільш придатне (рис. 8). Основними узагальнюючими критеріями вибору визначено близькість до місця висадки «Viking 1» i «Mars Pathfinder», де вже відома територія і відносно сприятлива кліматична зона.

5. ПРОПОНОВАНІ ЕТАПИ РОЗБУДОВИ НА МАРСІ

Від етапності освоєння і будівництва залежить не тільки відсоток наявної матеріально-ресурсної бази для будівництва, а й кількість людей, а отже, площа будівлі. Виокремлюють чотири етапи колонізації Марса [30]:

- дослідження,
- базове будівництво,
- розширення,
- тераформінг.

Фаза досліджень Марса триває вже деякий час, поки що за допомогою телескопічних і робото-технічних зйомок. Її метою є вирішення основних наукових питань, що стосуються історії Марса як планети, проведення обстеження на наявність ресурсів на планеті, визначення оптимальних місць для майбутньої місії, а також встановлення способу, за допомогою якого люди можуть подорожувати до Марса і жити там [30].

Суть базового етапу будівництва полягає у проведенні сільськогосподарських, промислових, хімічних та інженерних пошуків із виробництва на Марсі, щоб опанувати максимальну кількість методів, необхідних для перетворення марсіанської сировини на корисні ресурси. Перші розвідувальні місії використовуватимуть марсіанське повітря для переробки його у паливо і кисень. На етапі базового будівництва цей елементарний рівень використання місцевих ресурсів має перейти до видобутку води, вирощування рослин, виробництва кераміки, скла, металів, пластмас, інших матеріалів для інструментів і конструкцій тощо [30].

Початкова фаза досліджень на Марсі може бути виконана невеликим екіпажем (4...6 членів) чи взагалі засобами робототехніки. Фаза базового будівництва дасть змогу збільшити кількість людей до 50...100 осіб і оснастити обладнанням та джерелами енергії. Метою фази базового будівництва є опанування методів і засобів виробництва ресурсів для можливості розвитку місії, а також подальше вивчення планети [30].

Саме для цього етапу ми дослідили функціональні зв'язки та запропонували архітектурні рішення. Кількість людей для поселення прийнята умовно 100 осіб, із можливістю подальшого модульного розширення до 500. Ця цифра зумовлена як сучасними можливостями транспортної системи, так і необхідністю у певній кількості персоналу та робочої сили для даного етапу. Якщо марсіанська місія буде стійкою, буде перспектива діяти у напрямку розширення і тераформінгу планети, а це можливо тільки на основі досліджень і зваженої взаємодії із екосистемами Марса. Таким чином, освоєння Марса у певному сенсі є наслідком економічної життєздатності колонії.

6. ІЄРАРХІЯ ФУНКЦІЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА КОЛОНІЇ

Після вибору місця, обґрунтування необхідної кількості людей та зазначення етапу у загальній системі дослідження планети, на якому будується колонія, необхідно проаналізувати, які функціональні зони включатиме місія. Колонія — це квазізамкнена система, яка має свій «життєвий цикл» з використанням лише власних і наявних на планеті ресурсів. Отже, для створення зонування необхідно розуміти, як співвідносяться окремі функції місії. Для цього було розроблено схему ієрархії функцій (рис. 9), у основу якої покладено повний «життєвий цикл» колонії [3, 4]. У системі можна виділити такі головні функції: дослідницька, житлова і транспортна. Виробни-



Рис. 9. Ієрархія функцій дослідницької місії

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5



Рис. 10. Схема функціональних зв'язків для приміщень і споруд місії

цтво та переробка є додатковими функціями, які мають інтегруватися з основними і обслуговувати їх.

Дослідницькі функції поділяються на дві групи: ті, що пов'язані насамперед із дослідженням планети, і ті, які можуть бути корисніші саме для розвитку колонії, чи більш загальні. На етапі становлення колонії потреба у ресурсах буде нагальною, саме тому дослідження заради видобутку ресурсів будуть першочерговими. Потім, коли виробництво буде налагоджене, основною метою буде пошукова, археологічно-дослідницька місія.

Транспортна функція включає також дві основні групи — переміщення по поверхні планети та поза поверхнею планети, зокрема космічне сполучення.

Житлова функція визначена потребами людей і включає всі приміщення та системи для їхнього максимально комфортного і безпечного перебування на планеті. Виробничу функцію представлено потребою у матеріалах та конструкціях для підтримки та розвитку колонії. Виробництво є необхідною складовою замкненого циклу колонії, що можна визначити як показник стійкості.

Функція переробки призначена як зменшити відходи колонії, запускаючи їх назад у ланцюжок обігу ресурсів життєвого циклу і утилізуючи те, що неможливо переробити, так і з метою мінімізувати вплив на екологію. Забруднення відходами іншої планети є неприпустимим.

На основі ієрархії функцій було розроблено схему функціонального призначення споруд. На рис. 10 кольорами показано основні взаємозв'язки приміщень для розміщення функціональних систем колонії.

Житлова функція втілюється у об'ємному блоці житлових приміщень зі спортивним комплексом, рекреаційними зонами та іншими системами, необхідними для перебування людей. Дослідницьку функцію забезпечує блок лабораторій, різних за призначенням, але з можливістю суміщення та модульної перебудови. Транспортна функція представлена космодромом, окремими модулями для наземних рухомих одиниць та блоками обслуговування. Через велику кількість технічних систем, роботів та матеріалів виникає технічно-складський блок. До цього блоку можна також віднести всі споруди виробничої функції, оранжерею, як своєрідний осередок виробництва продуктів харчування, та блок переробки.

На основі описаної схеми було розроблено модулі споруд та обумовлені раціональні зв'язки між ними, що дозволило оптимізувати колонію як систему з гнучкими відношеннями функцій та можливістю їхньої зміни. Таким чином, майже на кожну із функцій розроблено свій модуль, відповідний до загальних потреб [3, 4].

7. ВИСНОВКИ І ОБГОВОРЕННЯ

Дослідження Марса і створення на цьому стаціонарної автономної місії є безумовно великим кроком для космічного майбутнього людства. Проаналізовано наявні дані про планету як середовище існування і фактори, що впливають на системи колонії. Показано, які місцеві ресурси можна використати при будівництві і як середовище впливатиме на споруди. Вибір місця посадки є необхідною умовою успішного створення першої колонії на Марсі. Опираючись на глобальні дані згідно з обраними критеріями, було проаналізовано територію задля виявлення найкращого місця розташування колонії. Після аналізу даних було запропоновано місце будівництва - територія біля посадки місії «Вікінг-1» у північній півкулі Марса. Безумовно, із накопиченням нових даних необхідний глибший та детальніший аналіз на основі описаних і можливо нових критеріїв. Із варіантів спорудження: на поверхні, під поверхнею, часткове занурення, над поверхнею - пропонується комбінований варіант - на поверхні і часткове занурення, що зменшує витрати та водночас дозволяє використати реголіт як захист від випромінювань. У майбутньому, після ретельних досліджень, для розміщення споруд можливо використати природні порожнини під поверхнею Марса, такі як лавові трубки.

Із визначення головних дослідницьких цілей місії розроблено структуру ієрархії функцій, що у свою чергу дозволило зробити функціональну схему споруд колонії та визначити доцільні функціональні зв'язки між спорудами і окремими приміщеннями. Живучість споруд пропонується досягати за рахунок їхньої конструктивної надійності, модульності, дублювання і диверсифікації систем забезпечення.

Проєктування на іншій планеті перш за все має на меті не ізольованість, а синтез з існуючою екосистемою. Використання планетарних ресурсів та створення колонії з повним замкненим життєвим циклом, незалежної від Землі, є основною передумовою успіху місії. Зведені фактори

¥ 7			
Умови та ресурси для спорудж	ення і функціону	вання місці на перш	их лвох фазах
e mobil tu peegpen Ani enepgan	••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	Dannin man na napa	min About theorem

Параметр умов	Фаза дослідження (первинне вирішення)	Фаза базового будівництва (стійка колонія)	
Кисень	Рослини у оранжереї, рециркуляція, видобуток із води, вуглекислого газу	Рослини на ґрунті, адсорбція із повітря	
Вода	Лід, рециркуляція	Рідка вода, рослини, адсорбція із повітря	
Енергія, паливо	Ядерна, вітрова, сонячний колектор	Геотермальна, сонячні батареї, біопаливо	
Будівельні матеріали	Лід, природні утворення, реголіт	Сталь, пластики, кераміка, скло тощо	
Їжа	Рослини у оранжереях	Рослини на ґрунті	
Виробничі матеріали	Переробка, видобуток з поверхні	Видобуток із під поверхні	
Магнітне поле	Локальні джерела	Глобальні генератори, часткова адаптація	
Радіація	Укриття, засоби захисту	Атмосферний захист, часткова адаптація	
Температура	Укриття, засоби захисту	Атмосферний захист	
Гравітація	Підтримання, спецкостюми, реабілітація	Повна або часткова адаптація	

існування, потреби у ресурсах для спорудження і функціонування місії та можливі напрямки їхнього первинного (фаза дослідження), та додаткового отримання після утворення стійкої колонії (50...100 років, фаза будівництва і далі) наведено у таблиці.

Ми розглянули лише частину того широкого кола технічних, транспортних, фінансових та інших задач, які складають комплексну проблематику забудови на Марсі. Спрямування зусиль людства від непродуктивної діяльності (війн, переспоживання тощо) до активного пізнання навколишнього космосу дасть розуміння про походження життя на Землі, збільшить стійкість нашої власної цивілізації та досягнення нею вищих рівнів розвитку у всесвітньому масштабі [1]. Надскладні задачі дослідження космосу виступають тригерами розвитку земних технологій, водночає розвиток технологій у космосі та на інших космічних тілах дає, окрім нової продукції, вторинний ефект поступу для Землі.

Україна — одна з небагатьох у світі держав, яка має ресурси, потенціал та інституціональні можливості для виробництва більшості видів власної аерокосмічної продукції. Космічна програма України на 2018—2022 роки [6] зокрема передбачає широке міжнародне співробітництво з державними та приватними структурами у сфері будування космічних комплексів. І дослідницька місія на Марс може стати одним із ефективних напрямків такого співробітництва. Україна як держава із розвиненою космічною і будівельною галузями має потенціал долучитися до світової місії пізнання Сонячної системи.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Білик А., Кириченко О. Аномалії та неминучість космічного майбутнього людства. *Anomalous phenomena: methodology and practice of research*. 36. наук. праць під ред. А. С. Білика. Київ: Політехніка, 2015. С. 7.
- 2. Вернадский В. Научная мысль как планетное явление. Москва: Наука, 1991. 268 с.
- 3. Гребенєва І. *Модульні сталеві конструкції споруд для марсіанської місії:* … бакалаврська робота. Київ: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2019. 155 с.
- 4. Гребенєва І. *Формування архітектури на Марсі. Алгоритми штучного інтелекту*: ... магістерська робота. Київ: Київ. нац. ун-т будівництва і архітектури, 2019. 110 с.
- 5. Зубрин Р. Как выжить на Марсе: Надежное пособие по выживанию и процветанию на Красной планете. Москва: Эксмо, 2015. 208 с.
- Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2018—2022 роки: Розпорядження Кабінету Міністрів України, опубл. 5 вересня 2018. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/ show/629-2018-%D1%80#n8 (дата звернення: 31.07.2019).
- 7. Саган К. Космос. Санкт-Петербург: Амфора, 2005. 448 с.
- 8. Урсул А. Д., Рубцов В. В., Абдуллаев А. В. и др. *Освоение космоса и проблемы экологии*. Кишинев: Штиинца, 1990. 272 с.
- Хижняк Н. Амбициозные и безумные планы Илона Маска по колонизации Марса на ближайшее столетие. 2018. URL: https://hi-news.ru/technology/ambicioznye-i-bezumnye-plany-ilona-maska-po-kolonizacii-marsa-na-blizhajsheestoletie.html (дата звернення: 20.07.2019).
- 10. Циолковский К. Жизнь в межзвездной среде. Москва: Наука, 1964. 84 с.
- 11. Brown D., Webster G., Hoover R. *NASA rover's first soil studies help fingerprint martian minerals*. 2012. URL: https://www. nasa.gov/home/hqnews/2012/oct/HQ_12-383_Curiosity_CheMin.html (дата звернення: 31.07.2019).
- 12. Extreme Planet Takes Its Toll. Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. 2007. URL: https://mars.nasa.gov/mer/spotlight/20070612.html. (дата звернення: 20.07.2019).
- 13. Ice House. SEArch. 2015. URL: http://www.marsicehouse.com/ (дата звернення: 20.07.2019).
- Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Yu., Videen G., Bell J., Wolff M. Measurements of winds on Mars with Hubble Space Telescope images in 2003 opposition. *Icarus*. 2006. 185. P. 97–101.
- 15. Mars Climate Database v5.3: The Web Interface. URL: http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mcd_python/ (дата звернення: 20.07.2019).
- 16. Mars Desert Research Station. Mars Society. 2019. URL: https://mdrs.marssociety.org/about-the-mdrs/ (дата звернення: 20.07.2019).

- 17. Mars Habitat. Foster+Partners. 2015. URL: https://www.fosterandpartners.com/projects/mars-habitat/ (дата звернення: 20.07.2019).
- 18. Mars Mineralogy. ESA. 2013. URL: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/05/Mars_mineralogy (дата звернення: 20.07.2019).
- 19. Mars Science City. BIG. 2019. URL: https://big.dk/#projects-mars (дата звернення: 20.07.2019).
- 20. Master Evidence Directory. Mars Anomaly Research. 2014. URL: http://www.marsanomalyresearch.com/evidencedirectories/9-master/master-directory.htm (дата звернення: 31.07.2019).
- 21. Methane on Mars. Wikipedia. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Methane_on_Mars (дата звернення: 31.07.2019).
- 22. *NASA Mars Rovers Braving Severe Dust Storms*. Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. 2007. URL: https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2007-080 (дата звернення: 20.07.2019,
- 23. Rackard N. *The world's first relocatable research center opens in Antarctica*. 2013. URL: https://www.archdaily.com/330453/ the-worlds-first-relocatable-research-center-opens-in-antarctica (дата звернення: 20.07.2019).
- 24. Shkuratov Yu., Kreslavsky M., Kaydash V., Videen G., Bell J., Wolff M., Hubbard M., Noll K., Lubenow A. Hubble space telescope imaging polarimetry of Mars during the 2003 opposition. *Icarus*. 2005. **176**. P. 1–11.
- 25. Simulated levels of methane in the martian atmosphere lifetime of 200 days. ESA. 2009. URL: http://sci.esa.int/marsexpress/45388-simulated-levels-of-methane-in-the-martian-atmosphere/ (дата звернення: 31.07.2019).
- Trainer M. G., Wong M. H., McConnochie T. H. Seasonal Variations in Atmospheric Composition as Measured in Gale Crater, Mars. 2019. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JE006175 agupubs.onlinelibrary.wiley. com (дата звернення: 09.03.2020).
- 27. Walsh N. NASA Endorses AI SpaceFactory's vision for 3D printed huts on Mars. 2018. URL: https://www.archdaily. com/898901/nasa-endorses-ai-spacefactorys-vision-for-3d-printed-huts-on-mars (дата звернення: 20.07.2019).
- 28. Wamelink G.W. *The ideal settlement site on Mars hotspots if you asked a crop.* 2018. URL: https://www.wur.nl/en/newsar-ticle/The-ideal-settlement-site-on-Mars-hotspots-if-you-asked-a-crop.htm (дата звернення: 20.07.2019).
- 29. Williams D. *Mars Fact Sheet*. 2018. URL: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html. (дата звернення: 20.07.2019).
- 30. Zubrin R. *The economic viability of Mars colonization*. 1998. URL: https://www.aleph.se/Trans/Tech/Space/mars.html (дата звернення: 20.07.2019).

Стаття надійшла до редакції 08.08.2019

REFERENCES

- 1. Bilyk A., Kirichenko O. (2015) Anomalous phenomena: methodology and practice of research research: Issue of scientific articles. Kyiv: Polytechnica, 2015 [in Ukrainian].
- 2. Vernadsky V. (1991). Scientific thought as a planetary phenomenon. Moscow: Nauka [in Russian].
- 3. Hrebenieva I. (2019). *Formation of architecture on Mars. Artificial intelligence algorithms*: ... Master's Thesis. Kiev: Kiev National University of Civil Engineering and Architecture [in Ukrainian].
- 4. Hrebenieva I. (2019). *Modular steel structures for Martian mission*: Bachelor's Thesis. Kiev: Kiev National University of Civil Engineering and Architecture [in Ukrainian].
- 5. Zubrin R. (2015). *How to Live on Mars: A Trusty Guidebook to Surviving and Thriving on the Red Planet*. Moskow: Eksmo [in Russian].
- The Cabinet of Ministers of Ukraine (2018, September 5) Order. On approval of the concept of the national target scientific and technical space program of Ukraine for 2018–2022. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/629-2018-%D1%80#n8 (Last accessed: 31.07.2019) [in Ukrainian].
- 7. Sagan C. (2005). Cosmos. St. Petersburg: Amphora [in Russian].
- 8. Ursul A. D., Rubtsov V. V., Abdullaev A. V., et al. (1990). *Space exploration and environmental problems*. Chisinau: "Stiince" [in Russian].
- 9. Hizhnyak N. (2018, October 16) *Elon Musk's ambitious and insane plans to colonize Mars for the next century*. URL: https:// hi-news.ru/technology/ambicioznye-i-bezumnye-plany-ilona-maska-po-kolonizacii-marsa-na-blizhajshee-stoletie.html (Last accessed: 20.07.2019) [in Russian].
- 10. Tsiolkovsky K. (1964). Interstellar life. Moscow: Nauka [in Russian].
- 11. Brown D., Webster G., Hoover R. (2012). *NASA rover's first soil studies help fingerprint martian minerals*. URL: https://www.nasa.gov/home/hqnews/2012/oct/HQ_12-383_Curiosity_CheMin.html (Last accessed 31.07.2019).
- Extreme planet takes its toll. (2007). Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. URL: https://mars. nasa.gov/mer/spotlight/20070612.html (Last accessed: 20.07.2019).
- 13. Ice House. (2015). SEArch. URL: http://www.marsicehouse.com/ (Last accessed 20.07.2019).

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

- Kaydash V., Kreslavsky M., Shkuratov Yu., Videen G., Bell J., Wolff M. (2006). Measurements of winds on Mars with Hubble Space Telescope images in 2003 opposition. *Icarus*, 185, 97–101.
- 15. Mars Climate Database v5.3: The Web Interface. URL: http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mcd_python/. (Last accessed: 20.07.2019).
- 16. *Mars Desert Research Station*. (2019). Mars Society. URL: https://mdrs.marssociety.org/about-the-mdrs/. (Last accessed: 20.07.2019).
- 17. *Mars Habitat*. (2015). Foster+Partners. URL: https://www.fosterandpartners.com/projects/mars-habitat/. (Last accessed: 20.07.2019).
- Mars Mineralogy. (2013). ESA. URL: https://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/05/Mars_mineralogy. (Last accessed: 20.07.2019).
- 19. Mars Science City. (2019). BIG. URL: https://big.dk/#projects-mars. (Last accessed 20.07.2019).
- Master Evidence Directory. (2014). Mars Anomaly Research. URL: http://www.marsanomalyresearch.com/evidencedirectories/9-master/master-directory.htm. (Last accessed: 31.07.2019).
- 21. Methane on Mars. (2019). Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Methane_on_Mars. (Last accessed 31.07.2019).
- 22. NASA Mars Rovers Braving Severe Dust Storms. (2007). Jet Propulsion Laboratory. The California Institute of Technology. URL: https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?release=2007-080. (Last accessed: 20.07.2019).
- Rackard N. (2013). The world's first relocatable research center opens in Antarctica. URL: https://www.archdaily.com/330453/ the-worlds-first-relocatable-research-center-opens-in-antarctica. (Last accessed: 07.20.2019).
- 24. Shkuratov Yu., Kreslavsky M., Kaydash V., Videen G., Bell J., Wolff M., Hubbard M., Noll K., Lubenow A. (2005). Hubble space telescope imaging polarimetry of Mars during the 2003 opposition. *Icarus*, **176**, 1–11.
- 25. Simulated levels of methane in the martian atmosphere lifetime of 200 days. (2009). ESA. URL: http://sci.esa.int/mars-express/45388-simulated-levels-of-methane-in-the-martian-atmosphere/ (Last accessed: 31.07.2019).
- Trainer M. G., Wong M. H., McConnochie T. H. (2019). Seasonal Variations in Atmospheric Composition as Measured in Gale Crater, Mars. URL: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JE006175 agupubs.onlinelibrary. wiley.com (Last accessed: 09/03.2020).
- Walsh N. (2018). NASA Endorses AI SpaceFactory's vision for 3D printed huts on Mars. URL: https://www.archdaily. com/898901/nasa-endorses-ai-spacefactorys-vision-for-3d-printed-huts-on-mars (Last accessed: 20.07.2019).
- Wamelink G. W. (2018). The ideal settlement site on Mars hotspots if you asked a crop. URL: https://www.wur.nl/en/newsarticle/The-ideal-settlement-site-on-Mars-hotspots-if-you-asked-a-crop.htm (Last accessed: 20.07.2019).
- 29. Williams D. (2018). *Mars Fact Sheet*. URL: https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/marsfact.html (Last accessed: 07.20.2019).
- 30. Zubrin R. (1998). *The economic viability of Mars colonization*. URL: https://www.aleph.se/Trans/Tech/Space/mars.html (Last accessed: 20.07.2019).

Received 08.08.2019

A. Bilyk^{1,2,3}, Master Engineer, Ph.D. in Tech., Cert. Engineer, Associate Professor

- *I. Hrebenieva*¹, Bachelor Engineer, Master of Architecture
- ¹ Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture
- 31 Povitroflotsky Ave., Kyiv, 03680 Ukraine
- ² Ukrainian Scientific Research Center for Analyses of Anomalies "Zond" (SRCAA "Zond")
- in National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
- 37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056 Ukraine
- ³ Aerospace society of Ukraine
- 11 Malevich Str., Kyiv, 03680 Ukraine

FEATURES OF THE DESIGN OF STRUCTURES IN THE CONDITIONS OF MARS

The article discusses the basic physical parameters and climatic features of Mars as a possible site for the construction of the first stationary research mission. They are the main factors of influence in the development of building structures for this planet. The analysis includes existing project proposals for buildings on Mars and effective means of protecting them against the negative impact of the environment, taking into account the experience of construction in complicated conditions on Earth. The detailed analysis of data allowed us to determine the parameters for the choice of location for building a colony. The parameters include soil composition, climatic indicators, terrain, level of cosmic radiation, methane fluctuations places, the equator zone, promising places for research, and successful landing places of the previous missions. Based on this, we justified the choice of

the building complex location, which is the decisive factor for construction. An important aspect is also the determination of the planet colonization stages and the building requirements based on the needs of the colony.

A project proposal has been developed for the second stage of planetary colonization. A colony is a quasi-closed system with its own "life cycle", consuming only its own resources and available resources of the planet.

The viability parameters of the project determine the full colony "life cycle". We propose the hierarchical system of functions of the research mission complex. It includes five main functions: research, transport, residential, production, and recycling. The principle of hierarchy is used for the development of functional parameters of premises and the determination of links between them. In general, three blocks can be distinguished: residential, scientific, technical, and warehouse, which is organically interconnected. The system of functions is maximally optimized for human needs in Martian conditions and is designed to integrate artificial intelligence into the colony. However, the problems considered in the article are only a part of a wide range of technical, transport, financial, and other tasks that make up the range of issues of Mars development.

Keywords: Mars, climat features of Mars, colonization, choice of place for construction, archaeological research mission, function hierarchy, Martian anomalies research, functional scheme.

https://doi.org/10.15407/knit2020.04.090 УДК 523.9+550.34

І. Е. ВАСИЛЬЄВА

старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук, старш. наук. співроб. E-mail: vasil@mao.kiev.ua

Головна астрономічна обсерваторія НАН України вул. Академіка Заболотного 27, Київ, Україна, 03143

ЧИ Є ЗВ'ЯЗОК МІЖ СОНЯЧНОЮ АКТИВНІСТЮ ТА ЗЕМЛЕТРУСАМИ?

Розглядається можливий зв'язок між сонячною активністю і сейсмічною активністю Землі. За допомогою перетворення Фур'є проаналізовано періодичність виникнення землетрусів магнітудою M > 7 за період 1900—2019 рр. і магнітудою $2.5 \le M \le 7$ за період 1973—2019 рр. Розраховано середньорічні, середньомісячні і добові значення сонячно-земних змінних та кількість землетрусів, інтенсивність яких потрапляє в задані межі. Для аналізу можливих зв'язків між сонячною і геосейсмічною активністю використано метод накладення епох. У кожному сонячному циклі було виділено чотири часових періоди: фази зростання, максимуму, спадання і мінімуму. Для кожного періоду аналізувалися глобальна кількість землетрусів по всій земній кулі і окремо землетрусів в областях розтягування і стиснення земної кори. Для всіх часових діапазонів і усіх обраних магнітуд землетрусів не знайдено статистично суттєвої залежності між сонячно-земними змінними і виникненням землетрусів. Виявлено збільшення кількості землетрусів у нічний період (на 10%) порівняно з денним, а також деяке збільшення кількості землетрусів після місцевого полудня. Зроблено висновок про сильну залежність результатів дослідження від вибірки даних. Ми не змогли підтвердити наявність прямого зв'язку між сонячною активністю і сейсмічною активністю Землі.

Ключові слова: сонячна активність, циклічність, землетруси, числа Вольфа, спалахи.

1. ВСТУП

Метою нашої роботи була перевірка можливих причинно-наслідкових зв'язків між геліо- і геофізичними процесами (плямами, спалахами та іншими активними явищами на Сонці) і землетрусами як характерними проявами активності Землі.

Землетрус є одним з найпотужніших катастрофічних природних явищ. Землетрус 11 березня 2011 р. магнітудою M = 9.0 (магнітуда землетрусу характеризує енергію, що виділилася у вигляді сейсмічних хвиль) був найбільшим зареєстрованим у Японії і четвертим за величиною землетрусом у світі з 1900 року. Він викликав цунамі, в результаті якого загинули майже 16 тис. осіб [23], і сталася ядерна аварія на АЕС Фукусіма. Річард Гросс з Лабораторії реактивного руху (NASA, Пасадена, Каліфорнія) розрахував, що цей землетрус скоротив земну добу на 1.8 мкс і змістив вісь Землі на 17 см. Землетрус 26 грудня 2004 р. M = 9.1 поблизу північної Суматри і супутнє йому сильне цунамі стало причиною загибелі близько 230 тис. осіб, скоротило добу на 6.8 мкс і змістило земну вісь приблизно на 7 см [4]. Згідно зі звітом [32], опублікованим у 2018 р. Управлінням ООН зі зменшення ризиків стихійних лих (UNISDR), за останні двадцять років відбулося різке зростання економічних втрат від кліматичних катастроф (на 151 %), і у першу чергу від землетру-

Цитування: Васильєва І. Е. Чи є зв'язок між сонячною активністю та землетрусами? *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 90—102. https://doi.org/10.15407/knit2020.04.090

сів. Так, на 563 землетруси і пов'язаних з ними цунамі припадає 747 234 загиблих, або 56 % від загальної кількості жертв природних катастроф. Тому вчасне передбачення землетрусу, що наближається, та зменшення можливих збитків від нього є актуальним завданням на сьогоднішній день. Можливій періодичності землетрусів різної магнітуди присвячено розділ 3.

Сонце — основне джерело енергії для Землі. Вплив сонячного випромінювання і заряджених частинок на поверхню Землі та її атмосферу вивчено досить добре. Можна очікувати, що Сонце впливатиме і на геофізичні процеси, такі як землетруси. Можливий зв'язок землетрусів з інтенсивністю випромінювання в сонячних лініях кисню обговорюється в роботах [2, 3], де стверджується, що інтенсивності ліній кисню 557.7 нм і 630.0 нм збільшуються перед землетрусом протягом шести днів до землетрусу з магнітудою понад 5 відносно середнього сезонного значення інтенсивностей до сейсмічних подій.

В роботі [6] зазначалося, що землетруси магнітудою $M \ge 8$ в Куньлуні (2001 р.), Монголії (1905 р.) і Сіньцзяні (1906 р.) були близькі за часом до максимумів сонячної активності, а землетруси у Сіньцзяні (1931 р.) і в Даньсяні в Тибеті (1951 р.) відбулися приблизно на 3...4 роки пізніше максимумів сонячної активності.

У ряді опублікованих робіт на основі емпіричного аналізу історичних даних виявлено зв'язки між сонячною і геосейсмічною активністю. Однак ці роботи суперечать одна одній і часто базуються на обмежених даних. Наприклад, в результаті досліджень [22, 30] найбільшу глобальну сейсмічність відзначено під час максимуму сонячного циклу і на фазі спаду, і навпаки, в роботах [21, 24, 28, 35] виявлено негативну кореляцію між сейсмічністю і сонячною активністю. У роботі [7] стверджується, що більше землетрусів відбувається близько мінімуму і на фазі спаду сонячного циклу. Відсутність істотної кореляції між сонячною активністю і сейсмічністю відзначено в роботах [15, 17, 36]. Відсутність кореляції зазначалася також для окремих географічних регіонів [34]. Нижче ми сподіваємося виявити такі кореляції в результаті аналізу історичних даних про сонячну активність (чисел Вольфа) з одного

боку, і глобальних і регіональних землетрусах — з іншого.

Найбільш яскравим проявом сонячної активності є сонячні спалахи. В роботі [1] зазначено, що шість сильних землетрусів (6.8 < M < 9.3) в районі Суматри (26 листопада — 26 січня 2004 р.) відбулися протягом приблизно 1.5 діб після збільшення геомагнітної активності, пов'язаної з сонячними спалахами. В роботі [26] на основі аналізу чотирьох спалахів класу Х (6-10 вересня 2017 р.) і фонового інтервалу (26 серпня — 5 вересня 2017 р. виявлено значне збільшення кількості землетрусів магнітуди 2.5 < M < 5.5 у період після спалахів. Можливі зв'язки сонячних спалахів (і викликаних ними сплесків геомагнітної активності) і землетрусів розглянуто в розд. 5. Зміна кількості землетрусів протягом доби і протягом року обговорюється в розд. 6.

2. ДАНІ

Як основну характеристику сонячної активності ми використовували багаторічні ряди чисел Вольфа [http://www.sidc.be/silso/datafiles] за період 1900—2019 рр. (Нагадаємо, що числа Вольфа характеризують кількість плям на диску Сонця і їх загальну площу і обчислюються для кожного дня за формулою W = k (f + 10g), де f — кількість спостережуваних плям, g — кількість спостережуваних груп плям, k — нормувальний коефіцієнт, що характеризує умови спостереження і апаратуру, яка використовується).

Дані про спалахи класів А, В, С, М, Х ми отримали з результатів спостережень рентгенівського випромінювання в діапазоні 0.1...0.8 нм, зроблених на супутниках GOES в 1974—2019 pp. [https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/], інформацію про найбільші спалахи (1996—2019 pp.) наведено на сайті SpaceWeatherLive.com [https:// www.spaceweatherlive.com/en/ solar-activity / top-50-solar-flares].

Для оцінки геомагнітної активності використовувався Ар-індекс, що відповідає середньодобовій планетарній амплітуді зміни магнітного поля Землі. Ар-індекс визначається як середнє з восьми значень змін найбільш збуреного елемента магнітного поля у тригодинному інтервалі часу на середньоширотних станціях і стано-



Рис. 1. Кореляційний зв'язок оцінок магнітуди землетрусів за даними EMSC і USGS ($M \ge 7$) та його апроксимація $M_{\rm USGS} = 0.9995 M_{\rm EMSC} + 0.0142$

вить від 0 до 280 нТл. Обчислюється Ар-індекс у геомагнітній обсерваторії Німек ім. Адольфа Шмідта (Adolf Schmidt Geomagnetic Observatory Niemegk) Центру ім. Гельмгольца у Потсдамі (Helmholtz-Centre Potsdam — GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam), що є членом Міжнародної служби геомагнітних індексів (International Service of Geomagnetic Indices) [https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/].

Для аналізу землетрусів за період 1900—2019 рр. використовувалися каталоги Європейсько-Середземноморського сейсмологічного центру (EMSC / CSEM) (дані 2004—2019 рр.) і Геологічної служби США (USGS) (1900—2019 рр.). На жаль, дані каталогів не однакові в оцінці магнітуд землетрусів. Так, проаналізувавши 225 найсильніших землетрусів ($M \ge 7$) на часовому відрізку з жовтня 2004 по липень 2019 рр. ми виявили незначні розбіжності в оцінках магнітуд. Але в окремих випадках, наприклад для землетрусу 23.12.2004 р. на півночі від острова Маккуорі, Австралія (і деяких інших), розбіжності доходять до ± 0.3 (що, втім, можна порівняти із заявленою точністю каталогів ± 0.25). Кореляційний зв'язок даних каталогів показано на рис. 1.

Для аналізу землетрусів ми використовували в основному дані USGS. Дані EMSC, через обмеженість часового ряду даних (один цикл сонячної активності 2004—2019 рр.), використовувалися для порівняння і не увійшли в остаточний результат.

3. ПЕРІОДИЧНІСТЬ ЗЕМЛЕТРУСІВ

Перш за все ми хотіли вивчити питання про періодичність землетрусів (табл. 1). Якби був знайдений період, близький до 8—12 років (період сонячного циклу), то це було б важливим аргументом на користь зв'язку землетрусів із сонячною активністю. У ранніх роботах [14, 18, 27, 31] заперечується наявність будь-якої періодичності землетрусів. Натомість у пізніших роботах [11, 10, 13, 16, 24, 33, 36] на прикладі окремих регіонів або для всієї земної кулі знайдено періоди різної тривалості між виникненням землетрусів.



Рис. 2. Періодограми розподілу кількості землетрусів для всієї земної кулі: a - для часового інтервалу 1973—2019 рр. (штрих-пунктирна лінія — $2.5 \le M \le 4$, точки — $4 \le M \le 6$, суцільна лінія — $M \ge 6$), $\delta - для$ часового інтервалу 1900—2019 рр. ($M \ge 7$)

Зокрема, в роботі [11] зроблено висновок, що є зв'язок між сонячною і сейсмічною активністю. Крім того, в роботі [12] зроблено цікавий висновок, що відсутність чіткої кореляції між мікроземлетрусами (M < 2.5) і місячними фазами свідчить про те, що, крім тектонічних і приливних сил, виникнення землетрусів має бути пов'язане з іншими факторами.

Ми проаналізували землетруси $M \ge 2.5$ по всій земній кулі і окремо для сейсмічно актив-

ного регіону на заході Південної Америки. При цьому тривалість рядів даних становила: 47 років для $2.5 \le M$ (1973—2019 рр.) і 118 років для M > 7 (1902—2019 рр.). У табл. 1 представлено літературні дані і результати застосування нами Фур'є-аналізу до даних про щорічні кількості землетрусів. Аналіз спектральної потужності річних значень кількості землетрусів, наведено у вигляді періодограм на рис. 2, показав, що практично для всіх діапазонів магнітуд (за винятком

Літературне джерело	Періодичність	Період, який аналізується	Магнітуда	Регіон
[14]	відсутня	1904—1952		Весь світ
[31]	відсутня	1942—1961		Нова Зеландія
[27]	відсутня	1961—1968		Весь світ
[18]	відсутня	1907—1975	≥8	Весь світ
[25]	312	1954—1975	≥4	Гімалайсько-Альпійський пояс
	7, 911, 18			Памір-Гіндукуш
	59, 14			Кедарнатх-Пітхорагарх
	8, 16			Тібет
	34			Шиллонг
	12			Високі Альпи
	9			Сахара
[13]	2.34; 5.56.5; 89; 1420, 3134	1898—1985	≥ 7.0	Весь світ
[33]	30	1910—1980	≥5	Китай
	2 3, 20	1977—1997		
[16]	9, 56	1765—1885	≥7.9	Каліфорнія
[24]	11	1975—2005	≥4	Весь світ
[11]	4; 4.5; 5.5; 9; 11, 13.5	1900—2015	≥7	Чілі
[36]	30.98, 42.20	1950—2015	≥5	Весь світ
[10]	2.33.3	1900—2014	$4.0 \le M \le 7.9$	Туреччина
Дана робота	3, 5, 6.5, 10, 13	1973-2019	$2.5 \le M \le 4.0$	Весь світ
	3, 11	1973—2019	$2.5 \le M \le 4.0$	Південна Америка
	33.5, 8, 13	1973—2019	$4.0 < M \le 5.0$	Весь світ
	34, 6, 7.5, 1112.5	1973—2019	$4.0 < M \le 5.0$	Південна Америка
	2.5, 8.5, 13	1973—2019	$5.0 < M \le 6.0$	Весь світ
	3, 7.5, 11.5	1973—2019	$5.0 < M \le 6.0$	Південна Америка
	34, 6, 10, 13	1973—2019	$6.0 < M \le 7.0$	Весь світ
	2.54, 66.5, 1011	1973—2019	$6.0 < M \le 7.0$	Південна Америка
	2.5, 4, 4.5, 6.5, 40	1900—2019	>7.0	Весь світ
	3.5, 4.5, 12.5, 2737	1900—2019	>7.0	Південна Америка
	2, 3.5, 5, 6.5, 8, 9, 13	1973—2019	≥2.5	Весь світ
	2.54, 6, 7.5, 911.5	1973—2019	≥2.5	Південна Америка

Таблиця 1. Періодичність землетрусів

ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26. № 5

M > 7 для всієї земної кулі) вдається виділити період 9—13 років, який приблизно відповідає циклу сонячної активності.

4. СОНЯЧНА АКТИВНІСТЬ І СЕЙСМІЧНА АКТИВНІСТЬ ЗЕМЛІ

Для аналізу можливих зв'язків між числами Вольфа і кількістю землетрусів у відповідний момент циклу ми скористалися методом накладання епох. Його суть полягає в тому, що якщо вихідні дані повторюються з певним періодом, то крива, отримана усередненням всіх значень вихідної кривої, розкладених за відповідними періодами, буде якось відрізнятися від константи, а будь-які неперіодичні зміни вихідної кривої будуть компенсовані. Для кожного сонячного циклу було виділено чотири часові області: фазу зростання, максимуму, спаду і мінімуму (включає в себе частини двох сусідніх сонячних циклів). Для визначення меж областей використовувалася така методика. Для кожного сонячного циклу визначалися максимальна і мінімальна кількість плям (по середньорічних значеннях). Різниця між максимальною і мінімальною кількістю плям для кожного циклу була поділена на шість (це число визначалося дослідним



Рис. 3. Середньорічні числа Вольфа *W* (суцільна лінія), максимуми та мінімуми (точки) і обрані початки фаз мінімуму, зростання, максимуму і спадання сонячної активності (зірочки і вертикальні прямі)

International (International International	lvy.com/page/List и дати початку фа	t-of-solar-cycles?c аз мінімуму, зрост	ивності за даннямі санту r=1] ання, максимуму і спадання сонячної активності
Howen	Πουστον	Mayoungay	Початок фази

OF MARAHANAH HURTIN AANAHAN ARTHRUAATI DA TAHUMU AANT

Номер	Початок	Максимум	Початок фази			
циклу	циклу	циклу	зростання	максимуму	спаду	мінімуму
14	01.1902	02.1906	10.1902	12.1904	01.1908	12.1910
15	07.1913	08.1917	08.1914	01.1917	02.1918	09.1921
16	08.1923	04.1928	06.1924	10.1926	05.1929	10.1931
17	09.1933	04.1937	12.1934	11.1936	01.1939	08.1942
18	02.1944	05.1947	04.1945	11.1946	07.1949	07.1952
19	04.1954	03.1958	05.1955	10.1956	05.1959	03.1962
20	10.1964	11.1968	10.1965	05.1967	10.1970	09.1974
21	03.1976	12.1979	07.1977	01.1979	10.1981	09.1984
22	09.1986	11.1989	07.1987	01.1989	10.1991	06.1994
23	08.1996	11.2001	07.1997	09.1999	09.2002	01.2006
24	12.2008	04.2014	04.2010	06.2013	10.2014	04.2017

Таблица 2 Поня



Рис. 4. Розподіл землетрусів за фазами сонячного циклу, отриманий методом накладання епох. Штрихи — «ідеальний» цикл сонячної активності (синусоїда з довільним нормуванням по амплітуді): a — дані 1977—2019 рр. (21—24-й сонячні цикли): $2.5 \le M \le 4$ (штрих-пунктирна лінія), $4 \le M \le 6$ (точки), $M \ge 6$ (суцільна лінія). Середня квадратична похибка показана для $M \ge 6$; δ — дані 1902—2019 рр. для $M \ge 7$ (жирна суцільна лінія — 14—24-й сонячні цикли, тонка суцільна лінія — 15—18-й цикли, пунктир — 17—20-й цикли, штрих-пунктир — 19—22-й цикли, довгі штрихи — 21—24-й цикли)

шляхом для забезпечення приблизної рівності за часом усіх чотирьох фаз). Для отриманих точок визначалися відповідні моменти часу. На ділянці підйому і спаду доводилося по чотири інтервали, на фази максимуму і мінімуму — по два, причому другий інтервал фази мінімуму належав наступному сонячному циклу (рис. 3). Розраховані нами дати початку фаз мінімуму, зростання, максимуму і спадання сонячної активності приведено у табл. 2.

Розраховані середні щомісячні кількості землетрусів було проінтерпольовано на ділянки фаз мінімуму, зростання, максимуму і спаду сонячної активності. Кількість точок інтерполяції була однаковою для кожної з фаз. У цьому випадку цикл сонячної активності можна представити синусоїдою. Для землетрусів $M \ge 2.5$ побудовано залежності для 21—24-го циклів сонячної активності (1977—2019 рр.). Згідно з висновками роботи [36] і нашими оцінками дані до 1973 р. для землетрусів M < 7 є неповними. Для землетрусів M > 7 побудовано залежності для 1902—2019 рр. (рис. 4).

Для землетрусів $M \ge 2.5$ (при аналізі 47 років спостережень, 21—24-й цикли сонячної активності) видно деяке збільшення кількості землетрусів у фазі мінімуму сонячного циклу і змен-



Рис. 5. Обрані зони областей стиснення-розтягування. Кожна точка відповідає одному землетрусу. Стрілками показані напрямки розтягування-стиснення

шення їхньої кількості на фазі зростання. Але при використанні даних для 11 сонячних циклів (більше 100 років спостережень) — ефект «замивається», стає порівнянним з помилкою, за винятком ділянки на фазі зростання, на якій кількість землетрусів помітно менша. Ми проаналізували також цей ефект для кількох груп сонячних циклів по чотири цикли у групі (з 15-го по 18-й, з 17-го по 20-й, з 19-го по 22-й, з 21-го по 24-й). Для цих майже 44-річних періодів



Рис. 6. Розподіл землетрусів по фазах сонячного циклу, отриманий методом накладання епох, усереднений у 5-річних інтервалах за даними 1977—2019 рр. (чотири сонячних цикли): *a* — Південна Америка, *δ* — регіон островів Фіджі, *в* — Атлантичний океан, *c* — Індійський океан (див. рис. 5). Штрихова лінія — «ідеальний» цикл сонячної активності (синусоїда з довільним нормуванням по амплітуді), суцільна лінія — 4 < *M* < 6, точки — *M* > 6

ніяких стійких залежностей кількості землетрусів від фази сонячного циклу не помічено, принаймні для землетрусів M > 7.

Висловлювалася гіпотеза [9], що сонячна активність по-різному діє на зони розтягування земної кори (серединно-океанські хребти і рифти) і зони стиснення (складчасті системи і острівні дуги). Перші — зони невеликої товщини земної кори (3.5...5 км) з поширенням тільки неглибокофокусних землетрусів. Зони стиснення характеризуються товщиною земної кори до 70 км і великою кількістю глибокофокусних землетрусів. За даними [9] у період збільшення сонячної активності відбувається збільшення сейсмічної і вулканічної активності у зоні стиснення Землі і зниження активності у зоні розтягування Землі. Для перевірки цієї гіпотези ми вибрали дві зони розтягування в Атлантичному і Індійському океані і дві зони стиснення — на заході Південної Америки і в районі островів Фіджі (рис. 5). Істотних відмінностей між кількістю землетрусів в зонах стиснення і розтягу-

Dariou	Кількість землетрусів		
Репон	$4 \le M \le 6$	<i>M</i> > 6	
Район островів Фіджі	65768	1652	
Південна Америка	30281	455	
Індійський океан	6178	126	
Атлантичний океан	5470	109	
Весь світ (1977—2019 рр.)	392339	6107	
Весь світ (1902—2019 рр.)	414595	11453	

Таблица 3. Кількість проаналізованих землетрусів різних балів для деяких регіонів

вання по відношенню до сонячного циклу не виявлено. Спостерігається збільшення кількості землетрусів у фазі мінімуму сонячного циклу і деяке зменшення у фазі росту і максимуму (див. рис. 6). Що довша вибірка, яка аналізується, то меншою стає кореляція з сонячним циклом. Загальну кількість землетрусів, розглянутих в даній роботі, приведено в табл. 3.

5. СПАЛАХИ, МАГНІТНІ БУРІ ТА ЗЕМЛЕТРУСИ

У роботі [28] допускається, що сонячні спалахи є спусковим механізмом для сильних землетрусів. Можливий зв'язок між спалахами класу X і збільшенням сейсмічної активності ($M \ge 4.5$) обговорюється також в роботі [5], де відзначається збільшення кількості сейсмічних подій протягом чотирьох днів після X-спалаху у порівнянні із середньомісячним значенням, і описано два землетруси M > 8.0, які, мабуть, були пов'язані з X-спалахами. У роботах [19, 20] на основі аналізу землетрусів 1900—2011 рр. з $M \ge 6$ показано, що ймовірність сильного землетрусу збільшується, коли геомагнітний індекс Кр досягає свого мінімального значення.

Найсильніший спалах на Сонці балу X28 стався 4 листопада 2003 р., інтенсивність його рентгенівського випромінювання у максимумі становила 2.8 мВт/м². На щастя, цей спалах стався на лімбі і практично не вплинув на Землю. Ми аналізували разом спалахи і індекс геомагнітної активності, тому що навіть потужний спалах, який відбувся на лімбі, швидше за все, не вплине на землетрус. За час проходження активної області по диску Сонця може відбуватися кілька десятків спалахів різної потужності. За цей же час на Землі відбувається кілька десятків / сотень землетрусів різних магнітуд. Але якщо навіть сонячний спалах і землетрус розділяє короткий проміжок часу, це не означає, що одне викликало інше. Якщо спалах є спусковим механізмом для землетрусу, то збільшення спалахової активності має призвести до збільшення кількості землетрусів. Іншими словами, через певний проміжок часу після кожного потужного спалаху на Землі має збільшуватися кількість землетрусів. Залишилося визначити цей часовий інтервал. Оскільки попередньо нам нічого не відомо про тривалість часового проміжку між спалахом і (можливо) викликаним ним землетрусом, то ми виділили максимуми геомагнітної активності (пов'язані і зі спалахами, і з космічними променями) і максимуми в усереднених за день кількостях землетрусів. Потім ми взяли різницю між моментами часу максимумів геомагнітної активності і моментами часу відповідних максимумів кількості землетрусів, підрахували, скільки разів зустрічається той чи інший інтервал між геомагнітних максимумом і збільшенням кількості землетрусів. Істотного збільшення кількості подій для будь-якого інтервалу часу (від 1 до 120 діб) не виявлено. Відсутність зв'язку між геомагнітними бурями і землетрусами відзначено також в роботі [34].

6. ДОБОВІ ТА СЕЗОННІ ВАРІАЦІЇ

Момент, коли відбувається землетрус, наведено в каталогах за всесвітнім часом, однак, на нашу думку, певний інтерес становить і розподіл землетрусів протягом доби.

Для кожного землетрусу обчислювався місцевий час, а також час сходу і заходу Сонця для координат точки землетрусу для даного дня. Кількість землетрусів по всій земній кулі підсумовувалась у півгодинних інтервалах. Була побудована залежність кількості землетрусів від місцевого часу. При цьому були отримані несподівані результати. Зокрема, в нічний час відбувається на 10 % землетрусів більше, ніж вдень. Крім того, спостерігається збільшення кількості землетрусів після місцевого полудня (рис. 7, *a*). Можливо, цей ефект пов'язаний зі зміною тем-



Рис. 7. Розподіл землетрусів за часом *t* доби: *a* — нормована кількість землетрусів, усереднена за кожні півгодини за місцевим часом для всієї земної кулі: жирна суцільна лінія — $M \ge 2.5$ (830301 подія), штрих-пунктирна лінія — $2.5 \le M \le 4$ (404034 події), пунктир — $4 \le M \le 6$ (414786 подій), тонка суцільна лінія — $M \ge 6$ (11481 подія); *б* — нормована кількість землетрусів за годину по всій земній кулі відносно моментів сходу і заходу ($M \ge 2.5$)



Рис. 8. Розподіл землетрусів по місяцях року ($M \ge 2.5$) за 1900—2019 рр.: суцільна лінія — для всієї земної кулі (830301 подій), пунктир — для північної півкулі ($\varphi > 30^\circ$, 423565 подій), штрихова лінія — для південної півкулі ($\varphi \le 30^\circ$, 67004 події). Значення нормовано на середні за рік окремо по півкулях і по всій земній кулі. Вгорі відзначено моменти зимового і літнього сонцестояння (ЗС і ЛС), а також весняного і осіннього рівнодення (ВР і ОР), внизу — положення перигелію (П) і афелію (А)

ператури протягом доби. В роботі [24] була знайдена суттєва кореляція (r = +0.77) між глобальним числом землетрусів і глобальною температурою приземного повітря протягом року.

Крім того, ми побудували залежність сумарної кількості землетрусів (з усередненням за 1 годи-

ну) від моментів сходу і заходу Сонця для місця події (рис. 7, δ). Видно, що кількість землетрусів за 4 год до сходу сонця збільшується приблизно на 5 % відносно середнього значення.

Цікавою видається зміна кількості землетрусів протягом року (рис. 8). Землетруси були розподілені на три групи по широті ф. Перша група включала землетруси в діапазоні $-30^{\circ} \le \phi \le 30^{\circ}$, друга — в діапазонах $-60^{\circ} \le \phi < -30^{\circ}$ і $30^{\circ} < \phi \le 60^{\circ}$ і третя — на широтах $\phi < -60^\circ$ і $\phi > 60^\circ$. Також аналізувалися всі землетруси по земній кулі $-90^{\circ} \le \phi \le 90^{\circ}$. У високих широтах реєструється невелика кількість землетрусів (2245 для φ < −60° і 34192 для $\phi > 60^\circ$), і вони не вносять істотного внеску у підсумковий результат, тому на графіку ми представили лише результати для φ < −30° і $\phi > 30^{\circ}$. Залежність від сезону (ймовірно, від температури) простежується для землетрусів, що відбуваються на широтах $\phi < -30^\circ$ і $\phi > 30^\circ$. Відзначимо, що збільшення кількість землетрусів у квітні — травні для північної півкулі супроводжується падінням кількості землетрусів в південній, а в вересні картина прямо протилежна. Землетруси в екваторіальній зоні ($-30^\circ \le \phi \le 30^\circ$) визначають середньомісячний розподіл землетрусів по земній кулі, при цьому простежується залежність від взаємного розташування Землі і Сонця. Поблизу точки афелію (найбільш віддалена від Сонця точка орбіти Землі) кількість землетрусів збільшується, поблизу точки перигелію (найближча до Сонця точка орбіти Землі) зменшується. Цікавим є також факт збільшення кількості землетрусів поблизу точки весняного рівнодення.

7. ВИСНОВКИ

Як механізм запуску землетрусів в результаті сонячних впливів розглядалися різні прояви сонячної активності.

Можна відзначити, що дуже часто висновки про зв'язок землетрусів і будь-яких проявів сонячної активності робляться на основі однієїдвох подій з того чи іншого боку [1, 6, 26]. Ми намагалися розглянути якомога більшу кількість землетрусів, порівняти ці результати з результатами, отриманими в умовах обмеженої вибірки. Як випливає з наших досліджень, необхідно залучати якомога повніші дані при аналізі можливих зв'язків між сонячною активністю і землетрусами. Але що більше даних ми аналізуємо, то слабшим виявляється цей зв'язок.

Таким чином, неможливо не погодитися з висновками роботи [15] про те, що в даний момент немає статистично істотних залежностей між сонячно-земними змінними і виникненням землетрусу. І хоча не можна остаточно відкинути гіпотезу про сонячний механізм запуску землетрусів, поки що він явно не проявляється.

Що стосується довгострокових, і особливо короткострокових прогнозів землетрусів, то нам здається, що робити їх на основі даних про сонячну активність немає підстав.

ЛІТЕРАТУРА

- 1. Anagnostopoulos G., Papandreou A. Space conditions during a month of a sequence of six *M* > 6.8 earthquakes ending with the tsunami of 26 December 2004. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.* 2012. **12**. P. 1551–1559.
- Fishkova L. M., Gokhberg M. B., Pilipenko V. A. Relationship between night airglow and seismic activity. *Ann. Geophys.* 1985. 3(6). P. 689–694.
- 3. Gole P. K., Midya S. K., Panda P., Nandi A. Intensity variations of O I 557.7 nm and O I 630.0 nm lines before M5.0 and greater earthquakes in Tokyo region, Japan, in 1979 to 1990. *Atmos. and Oceanic Opt.* 2018. **31**(6). P. 670–677.
- 4. Gross R. S., Chao B. The rotational and gravitational signature of the December 26, 2004 Sumatran earthquake. *Surv. Geophys.* 2006. **27**. P. 615–632.
- Hagen M., Azevedo A. Possible Connections between X-Solar Flares and Worldwide Variation in Seismicity Enhancement. *Natur. Sci.* 2017. 9(12). P. 457–476.
- 6. Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L. Possible triggering of solar activity to big earthquakes (Ms ≥8) in faults with near west-east strike in China. *Sci. in China. Ser. G Phys., Mech. and Astron.* 2004. **47**(2). P. 173–181.
- 7. Huzaimy J. M., Yumoto K. Possible correlation between solar activity and global seismicity. Proc. 2011 IEEE Int. Conf. Space Sci. Comm. Penang Malaysia. 2011. P. 138–141,
- Jusoh M. H. Solar Activity and Seismicity.— A dissertation submitted by the Department of Earth and Planetary Sciences Graduate School of Science in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Science Kyushu University Fukuoka, Japan. 2013. 90 p.
- 9. Khain V. E., Khalilov E. N. About possible influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: long-term forecast. *Trans. Int. Acad. Sci. H&E. SWB*. 2007/2008. **3**. P. 217–256.
- Kızılok Kara E., Durukan K. The statistical analysis of the earthquake hazard for Turkey by generalized linear models. *Gazi Univ. J. Sci.* 2017. **30**(4). P. 584–597.
- 11. Larocca, P. A. Application of the cross wavelet transform to solar activity and major earthquakes occurred in Chile. *Int. J. Geosci.* 2016. 7(11). P. 1310–1317.
- 12. Lin C.-H., Yeh Y. H., Chen Y.-I., Zheng B., Chen K. J. Earthquake clustering relative to lunar phases in Taiwan. *Terrest. Atmos. and Oceanic Sci.* 2003. **14**(3). P. 1–10.
- Liritzis I., Tsapanos T. M. Probable evidence for periodicities in global seismic energy release. *Earth, Moon and Planets*. 1993. 60(2). P. 93–108.
- 14. Lomnitz C. Estimation problems in earthquake series. *Tectonophysics*. 1964. 1(2). P. 193-203.
- 15. Love J. J., Thomas J. N. Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.* 2013. **40**(6). P. 1165–1170.

- McMinn D. 9/56 year cycle: 18th & 19th century world earthquakes. New Concepts in Global Tectonics. Newsletter. 2012. 65. P. 15–26.
- 17. Meeus J., Gribbin J. Sunspots and earthquakes. *Physics Today*. 1976. 29(6). P. 11-12.
- 18. Michael M. O. Fluctuations in yearly numbers of $M \le 8.0$ earthquakes, 1900–1975. *New Zealand J. Geol. and Geophys.* 1978. **21**(1). P. 135–136.
- 19. Midya S. K., Gole P. K Trend of major earthquakes during the period 1900–2011 and its association with some solar and geomagnetic parameters. *Indian J. Phys.* 2013. **88**(1). P. 1–4.
- 20. Midya S. K., Panda P. Study of Major Earthquakes (Magnitude ≥6 Richter Scale) with Cp Index During the Period 2001–2007. *Pacif. J. Sci. and Technol.* 2013. **14**(1). P. 586–592.
- 21. Nikouravan B. Do Solar Activities Cause Local Earthquakes? (New Zealand). Int. J. Fundamen. Phys. Sci. 2012. 2. P. 20-23.
- 22. Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. Chem. Earth.* 2006. **31**. P. 88–93.
- Police Countermeasures and Damage Situation associated with 2011Tohoku district off the Pacific Ocean Earthquake. June 10, 2019. URL: https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo_e.pdf, https://www.unisdr.org/ archive/61121 (дата звернення: 24.12.2019).
- Rajesh R., Tiwari R. K. Brief Communication: Correlation of global earthquake rates with temperature and sunspot cycle. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.* 2014. 2(4). P. 2851–2867.
- Rao N. M., Kaila K. L. Model of earthquake-energy periodicity in the Alpide-Himalayan seismotectonic belt. *Tectonophysics*. 1986. 124(3). P. 261–270.
- Ruzhin Yu., Novikov V. The response of global seismicity to solar flares of September, 2017. Int. J. Electron. Appl. Res. 2018. 5(2). P. 1–10.
- 27. Shlien S., Toksöz M. N. A clustering model for earthquake occurrences. Bull. Seismol. Soc. Amer. 1970. 60(6). P. 765–1787.
- 28. Simpson J. F. Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1967–1968. 3. P. 417–425.
- 29. Sukma I., Abidin Z. Z. Study of seismic activity during the ascending and descending phases of solar activity. *Indian J. Phys.* 2017. **91**(6). P. 595–606.
- 30. Tavares M., Azevedo A. Influences of solar cycles on earthquakes. Natur. Sci. 2011. 3(6). P. 436-443.
- 31. Vere-Jones D., Davies R. B. A statistical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zealand. *New Zealand J. Geol. and Geophys.* 1966. **9**(3). P. 251–284.
- 32. Wallemacq P., Below R., McLean D. UNISDR and CRED report: Economic Losses, Poverty & Disasters (1998–2017). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. 2018. URL: https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018_ Economic %20Losses.pdf (дата звернення: 24.12.2019).
- 33. Xingxin D. Wavelets Data Based Analysis of Dynamic Seismicity Period. Earthquake. 1997. 17. P. 257-264.
- 34. Yesugey S. C. Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula. *Earth Sci. Res. J.* 2009. **13**. P. 82–89.
- 35. Zhang G.-Q. Relationship between global seismicity and solar activities. Acta Seismol. Sinica. 1998. 11. P. 495-500.
- 36. Zhang Z. X., Li X. The sinusoidal periodicity nature for $M \ge 5$ global earthquakes. 2016. arXiv:1607.05391v1 [physics.geo-ph] 19 Jul 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1607.05391 (дата звернення: 24.12.2019).

Стаття надійшла до редакції 24.12.2019

REFERENCES

- 1. Anagnostopoulos G., Papandreou A. (2012). Space conditions during a month of a sequence of six M > 6.8 earthquakes ending with the tsunami of 26 December 2004. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.*, **12**, 1551–1559.
- Fishkova L. M., Gokhberg M. B., Pilipenko V. A. (1985). Relationship between night airglow and seismic activity. *Ann. Geophys.*, 3(6), 689–694.
- 3. Gole P. K., Midya S. K., Panda P., Nandi A.(2018). Intensity variations of O I 557.7 nm and O I 630.0 nm lines before M5.0 and greater earthquakes in Tokyo region, Japan, in 1979 to 1990. *Atmos. and Oceanic Opt.*, **31**(6), 670–677.
- 4. Gross R. S., Chao B. (2006). The rotational and gravitational signature of the December 26, 2004 Sumatran earthquake. *Surv. Geophys.*, **27**, 615–632.
- 5. Hagen M., Azevedo A. (2017). Possible connections between X-solar flares and worldwide variation in seismicity enhancement. *Natur. Sci.*, **9(1**2), 457–476.
- 6. Han Y., Guo Z., Wu J., Ma L. (2004). Possible triggering of solar activity to big earthquakes (Ms ≥8) in faults with near westeast strike in China. *Sci. in China. Ser. G Phys., Mech. and Astron.,* **47**(2), 173–181.
- Huzaimy J. M., Yumoto K. (2011). Possible correlation between solar activity and global seismicity. Proc. 2011 IEEE Int. Conf. Space Sci. Comm. Penang Malaysia, 138–141.

- Jusoh M. H. (2013). Solar Activity and Seismicity.— A dissertation submitted by the Department of Earth and Planetary Sciences Graduate School of Science in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Science Kyushu University Fukuoka, Japan. 90 p.
- Khain V. E., Khalilov E. N. (2007/2008). About Possible influence of solar activity upon seismic and volcanic activities: long-term forecast. *Trans. Int. Acad. Sci. H&E.*, SWB, 3, 217–256.
- Kızılok Kara E., Durukan K. (2017). The statistical analysis of the earthquake hazard for Turkey by generalized linear models. *Gazi Univ. J. Sci.*, 30(4), 584–597.
- 11. Larocca P. A. (2016). Application of the Cross Wavelet Transform to Solar Activity and Major Earthquakes Occurred in Chile. *Int. J. Geosci.*, 7(11), 1310–1317.
- 12. Lin C.-H., Yeh Y. H., Chen Y.-I., Zheng B., Chen K. J. (2003). Earthquake clustering relative to lunar phases in Taiwan. *Terrest. Atmos. and Oceanic Sci.*, **14**(3), 1–10.
- 13. Liritzis I., Tsapanos T. M. (1993). Probable Evidence for Periodicities in Global Seismic Energy Release. *Earth, Moon, and Planets.*, **60**(2), 93–108.
- 14. Lomnitz C. (1964). Estimation problems in earthquake series. *Tectonophys.*, 1(2), 193–203.
- 15. Love J. J., Thomas J. N. (2013). Insignificant solar-terrestrial triggering of earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(6), 1165–1170.
- McMinn D. (2012). 9/56 year cycle: 18th & 19th century world earthquakes. New Concepts in Global Tectonics. Newsletter, 65, 15–26.
- 17. Meeus J., Gribbin J. (1976). Sunspots and earthquakes. *Physics Today*, 29(6), 11–12.
- 18. Michael M. O. (1978). Fluctuations in yearly numbers of $M \le 8.0$ earthquakes, 1900–1975. New Zealand J. Geol. and Geophys., **21**(1), 135–136.
- Midya S. K., Gole P. K. (2013). Trend of major earthquakes during the period 1900–2011 and its association with some solar and geomagnetic parameters. *Indian J. Phys.*, 88(1), 1–4.
- Midya S. K., Panda P. (2013). Study of major earthquakes (Magnitude ≥6 Richter Scale) with C_p index during the period 2001–2007. *Pacif. J. Sci. and Technol.*, 14(1), 586–592
- 21. Nikouravan B. (2012). Do solar activities cause local earthquakes? (New Zealand). Int. J. Fundamental Phys. Sci., 2, 20–23.
- 22. Odintsov S., Boyarchuk K., Georgieva K., Kirov B., Atanasov D. (2006). Long-period trends in global seismic and geomagnetic activity and their relation to solar activity. *Phys. Chem. Earth*, **31**, 88–93.
- Police countermeasures and damage situation associated with 2011Tohoku district off the Pacific Ocean Earthquake. June 10, 2019. URL: https://www.npa.go.jp/news/other/earthquake2011/pdf/higaijokyo_e.pdf, https://www.unisdr.org/ archive/61121. (Last accessed: 24.12.2019).
- Rajesh R., Tiwari R. K. (2014). Brief communication: Correlation of global earthquake rates with temperature and sunspot cycle. *Natur. Hazards and Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2(4), 2851–2867.
- 25. Rao N. M., Kaila K. L. (1986). Model of earthquake-energy periodicity in the Alpide-Himalayan seismotectonic belt. *Tectonophys.*, **124**(3), 261–270.
- 26. Ruzhin Yu., Novikov V. (2018). The response of global seismicity to solar flares of September, 2017. *Int. J. Electron. Appl. Res.*, **5**(2), 1–10.
- 27. Shlien S., Toksöz M. N. (1970). A clustering model for earthquake occurrences. Bull. Seismol. Soc. Amer., 60(6), 765–1787.
- 28. Simpson J. F. (1967–1968). Solar activity as a triggering mechanism for earthquakes. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **3**, 417–425.
- 29. Sukma I., Abidin Z. Z. (2017). Study of seismic activity during the ascending and descending phases of solar activity. *Indian J. Phys.*, **91**(6), 595–606.
- 30. Tavares M., Azevedo A. (2011). Influences of solar cycles on earthquakes. Natur. Sci., 3(6), 436-443.
- Vere-Jones D., Davies R. B. (1966). A statistical survey of earthquakes in the main seismic region of New Zealand. New Zealand J. Geol. and Geophys., 9(3), 251–284.
- Wallemacq P., Below R., McLean D. (2018). UNISDR and CRED report: Economic Losses, Poverty & Disasters (1998–2017). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. URL: https://www.unisdr.org/2016/iddr/IDDR2018_Economic %20Losses.pdf (Last accessed: 24.12.2019).
- 33. Xingxin D. (1997). Wavelets Data Based Analysis of Dynamic Seismicity Period. Earthquake, 17, 257-264.
- Yesugey S. C. (2009). Comparative evaluation of the influencing effects of geomagnetic storms on earthquakes in the Anatolian Peninsula. *Earth Sci. Res. J.*, 13, 82–89.
- 35. Zhang G.-Q. (1998). Relationship between global seismicity and solar activities. Acta Seismol. Sinica, 11, 495-500.
- 36. Zhang Z. X., Li X. *The sinusoidal periodicity nature for M* ≥ 5 *global earthquakes*. 2016. arXiv:1607.05391v1 [physics.geo-ph] 19 Jul 2016. URL: https://arxiv.org/abs/1607.05391 (Last accessed: 24.12.2019).

Received 24.12.2019

I. Е. Васильєва

I. E. Vasylieva

Senior Researcher, Ph.D. in Phys.& Math., Senior Researcher E-mail: vasil@mao.kiev.ua

Main Astronomical Observatory, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine 27 Akademika Zabolotnoho St., Kyiv, 03143 Ukraine

IS THERE ANY CONNECTION BETWEEN SOLAR ACTIVITY AND EARTHQUAKES?

A possible relationship between solar activity and the seismic activity of the Earth is considered. We analyzed the frequency of occurrence of earthquakes of various magnitudes with the Fourier transform: for $M \ge 7$ over the period 1900—2019 and for $2.5 \le M \le 7$ over the period 1973—2019. The average annual, monthly, and daily values of the solar-terrestrial variables, the number of earthquakes with intensities that fall within the specified boundaries are calculated. The epoch overlapping method was used to analyze the possible relationship between the Wolf numbers and the number of earthquakes at the corresponding moment in the cycle. 4 periods of each solar cycle were identified: the phase of ascending, maximum, descending, and minimum. Earthquakes over the entire globe and in the regions of extension and compression of the earth's crust were analyzed for each phase. No statistically significant dependencies between solar-terrestrial variables and earthquake initiation were found for all time intervals and all selected earthquake magnitudes. An interesting fact was established concerning the change in the number of earthquakes at different periods of the day. The number of earthquakes after local noon was also detected. We could not confirm the existence of a direct connection between solar activity and the seismic activity of the Earth, but we cannot also claim that such a connection does not exist.

Keywords: solar activity, cyclicity, earthquakes, Wolf numbers, solar flares.