

УДК 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104>

Наведено результати геологічних, стратиграфічних, палеонтологічних, гідрогеологічних, геофізичних і геоінформаційних досліджень.

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	Вижва Сергій , д-р геол. наук, проф. (Україна) Албані Абдер Ель , д-р філософії, проф. (Франція); Артеменко Геннадій , д-р геол. наук, проф. (Україна); Бахмутов Володимир , д-р геол. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Бондар Ксенія , д-р геол. наук (Польща); Веснавер Альдо , д-р філософії, проф. (Італія); Вижва Зоя , д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); Діндароглу Тургай , д-р філософії, проф. (Туреччина); Донатіс Мауро , д-р філософії, доц. (Італія); Дубина Олександр , д-р геол. наук, доц. (Україна); Загнітко Василь , д-р геол.-мінералог. наук, проф. (Україна); Зацерковний Віталій , д-р техн. наук, проф. (Україна); Зенг Квінглі , д-р філософії (Китай); Іванік Олена , д-р геол. наук, проф. (Україна); Івахненко Олександр , д-р філософії, проф. (Казахстан); Карпенко Олексій , д-р геол. наук, проф. (Україна); Коронеос Антоніс , д-р філософії, проф. (Греція); Корчагін Ігнат , д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Кошляков Олексій , д-р геол. наук, проф. (Україна); Курило Марія , д-р геол. наук, доц. (Україна); Лі Циншен , д-р філософії, проф. (Китай); Лозицький Всеволод , д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Маслов Борис , д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); Меньшов Олександр , д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. ред.) (Україна); Митрохин Олександр , д-р геол. наук, проф. (Україна); Михайлов Володимир , д-р геол. наук, проф. (Україна); Міліневський Геннадій , д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Мірончук Тетяна , канд. філол. наук, доц. (Україна); Нестеровський Віктор , д-р геол. наук, проф. (Україна); Огар Віктор , д-р геол. наук, проф. (Україна); Олівія Марк , д-р філософії, проф. (Португалія); Орлюк Михайло , д-р геол. наук, проф. (Україна); Пастушенко Тетяна , канд. філол. наук, доц. (Україна); Перейра Пауло , д-р філософії, проф. (Литва); Портнов Василь , д-р філософії, проф. (Казахстан); Спассов Сімо , д-р філософії, проф. (Бельгія); Шабатура Олександр , д-р геол. наук, доц. (заст. голов. ред.) (Україна); Шевченко Олексій , д-р геол. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Шевчук Віктор , д-р геол.-мінералог. наук, проф. (Україна); Шмідт Волькмар , д-р філософії, проф. (Німеччина); Шнюков Сергій , д-р геол. наук, доц. (Україна)
Адреса редколегії	ННІ "Інститут геології" вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022 ☎ (38044) 521 33 38 e-mail: geology.bulletin@knu.ua ; geolvisnyk@ukr.net web: https://geology.bulletin.knu.ua/
Затверджено	вченою радою ННІ "Інститут геології" 21.02.24 (протокол № 11)
Зареєстровано	Міністерством юстиції України Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 25418-15358 ПР від 03.02.23
Атестовано	Міністерством освіти і науки України (категорія А) Наказ № 1412 від 18.12.18
Індексування	Web of Science (квартиль 4, імпакт фактор 0.3), Research Bib, Google Scholar, Crossref
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" Свідоцтво внесено до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02
Адреса видавця	ВПЦ "Київський університет" б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601 ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28 e-mail: vpcc@knu.ua

BULLETIN

TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

ISSN 1728-2713 (Print), ISSN 2079-9063 (Online)

GEOLOGY

1(104)/2024

Established in 1958

UDC 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104>

Published are the results of geological, stratigraphic, paleontological, hydrogeological, geophysical and geoinformation research.

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

EDITOR-IN-CHIEF	Vyzhva Sergiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine)
EDITORIAL BOARD	Albani Abderrazak El, PhD, Prof. (France); Artemenko Gennadiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Bakhmutov Volodymyr, DSc (Geol.), Senior Researcher (Ukraine); Bondar Kseniia, DSc (Geol.) (Poland); Dindaroğlu Turgay, PhD, Prof. (Turkey); De Donatis Mauro, PhD, Assoc. Prof. (Italy); Dubyna Oleksandr, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Ivakhnenko Oleksandr, PhD, Prof. (Kazakhstan); Ivanik Olena, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Karpenko Oleksiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Korchagin Ignat, DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); Koroneos Antonis, PhD, Prof. (Greece); Koshliakov Oleksiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Kurylo Mariia, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Liu Qingsheng, PhD, Prof. (China); Lozitsky Vsevolod, DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); Maslov Borys, DSc (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); Menshov Oleksandr, DSc (Geol.), Senior Researcher (Executive Editor) (Ukraine); Milinevskiy Gennadiy, DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); Mironchuk Tatyana, PhD (Philol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Mykhailov Volodymyr, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Mytrokhin Oleksandr, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Nesterovskiy Viktor, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Ogar Viktor, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Olivia Marc, PhD, Prof. (Portugal); Orliuk Mykhailo, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Pastushenko Tatyana, PhD (Philol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Pereira Paulo, PhD, Prof. (Lithuania); Portnov Vasyl, PhD, Prof. (Kazakhstan); Schmidt Volkmar, PhD, Prof. (Germany); Shabatura Oleksandr, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Deputy Editor-in-Chief) (Ukraine); Shevchenko Oleksiy, DSc (Geol.), Senior Researcher (Ukraine); Shevchuk Viktor, DSc (Geol. & Mineral.), Prof. (Ukraine); Shnyukov Sergiy, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Spassov Simo, PhD, Prof. (Belgium); Vesnaver Aldo, PhD, Prof. (Italy); Zeng Qingli, PhD (China); Vyzhva Zoya, DSc (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); Zacerkovniy Vitaliy, DSc (Tech.), Prof. (Ukraine); Zagnitko Vasyl, DSc (Geol. & Mineral.), Prof. (Ukraine)
Address	USI "Institute of Geology" 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 ☎ (38044) 521 33 38 e-mail: geology.bulletin@knu.ua , geolvisnyk@ukr.net web: https://geology.bulletin.knu.ua/
Approved by	the Academic Council of the USI "Institute of Geology" 21.02.24 (protocol № 11)
Registered by	the Ministry of Justice of Ukraine Certificate of state registration № 25418-15358 NP dated 03.02.23
Certified by	the Ministry of Education and Science of Ukraine (category A) Order № 1412 dated 18.12.18
Indexing	Web of Science (Quartile 4, Impact Factor 0.3), Research Bib, Google Scholar, Crossref
Founded and published	Taras Shevchenko National University of Kyiv Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University" Certificate of entry into the State Register ДК № 1103 dated 10.31.02
Address	PPC "Kyiv University" 14, Taras Shevchenko blvd., Kyiv, 01601 ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28 e-mail: vpc@knu.ua

© Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University", 2024

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

ІВАНІК Олена, ШЕВЧУК Віктор, ТУСТАНОВСЬКА Любов, ГАДЯЦЬКА Катерина Блоковий характер новітньої тектоніки Середнього Придніпров'я на основі карт різниць базисних поверхонь	5
---	---

ГЕОФІЗИКА

ІГНАТИШИН Василь, МАЛИЦЬКИЙ Дмитро, ІЖАК Тібор, МОЛНАР Д. Стефан, ІГНАТИШИН Моніка, ІГНАТИШИН Адальберт Геодинамічний стан Закарпатського внутрішнього прогину за результатами деформометричних спостережень у регіоні	13
КРАСНИКОВА Олена, КУЗЬМЕНКО Павло, ВИЖВА Сергій Аналіз методів визначення індексу крихкості та їх застосування для теригенних порід-колекторів Дніпровсько-Донецької западини	22
МЕНЬШОВ Олександр Вплив міграції флюїдів на магнітну мінералогію ґрунтів	30

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

ГУБІНА Вікторія, ВЕРХОВЦЕВ Валентин, ЯЦЕНКО Віктор, ПОКАЛЮК Володимир, ЗАБОРОВСЬКА Лариса, ЛАВРИНЕНКО Олена, ЛИТВИНЕНКО Юрій Мінеральні та фізико-хімічні зміни магнетитових кварцитів Валякинського та Новокриворізького родовищ Кривбасу в процесах їх переробки	36
ПУШКАРЬОВ Олександр, СЕВРУК Ірина, ЗУБКО Олександр, ДОЛІН Віталій, ДЕМІХОВ Юрій, СКРИПКІН Вадим Взаємодія $H(D,T)O$ з мінеральними адсорбентами у стаціонарних системах	49

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

МИХАЙЛОВ Володимир Тенденції розвитку гірничорудної промисловості України у світовому контексті	55
КУРИЛО Марія, КОШАРНА Софія Стратегічне значення рідкісноземельних елементів для сучасних технологій та перспективи вітчизняних родовищ	63
НІКІТЕНКО Олександр Поля напружень та геологічна структура західного замикання Горлівської антикліналі Донбасу. Частина 2. Поля напружень і деформацій	70
ЛИТВИНЮК Станіслав, БАЛЯЦЬКА Наталія Методичні підходи визначення та оцінки ресурсного потенціалу критичної мінеральної сировини України	77

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

ЄМЕЛЬЯНОВ Володимир, НАСЕДКІН Євген, ІВАНІК Олена, КУКОВСЬКА Тамара, ЮХИМЧУК Володимир, МІТРОФАНОВА Олександра Особливості розподілу макро- та мікропластику в межах пляжевих зон внутрішньоконтинентальних морів (на прикладі пляжевої зони м. Южне, Україна)	86
ТРОФИМЕНКО Петро, ТОМЧЕНКО Ольга, ПОРАЛО Ростислав, ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій, СТАХІВ Ірина Дистанційна ідентифікація мікрозападинних форм рельєфу та ділянок ґрунтового покриву агроландшафтів Полісся України з ознаками гідроморфності	98
ЛЮТА Наталія, САНИНА Ірина Особливості хімічного складу підземних вод у теригенних відкладах еоцену та альб-сеноману в басейні Дніпра	107
ПАНАСЮК Микола, СОСОННА Наталія, КОВАЛЕНКО Ігор, БУЗИННИЙ Михайло, ШЕВЧЕНКО Олексій Постійна математична модель фільтраційних і міграційних умов межіріччя Прип'ять – Уж Чорнобильської зони відчуження	115

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

ОХРІМЧУК Роман, ДЕМИДОВ Всеволод, СЛЮСАР Катерина, ЛУКОМСЬКИЙ Владислав Вивчення екзогенних процесів західного узбережжя Кримського півострова із застосуванням методів глибинного навчання	124
--	-----

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

IVANIK Olena, SHEVCHUK Viktor, TUSTANOVSKA Lyubov, HADIATSKA Kateryna The block character of the recent tectonics of the Middle Dnieper basic maps differences of base surfaces.....	5
--	---

GEOFYSICS

IHNATYSHYN Vasyl, MALYTSKYY Dmytro, IZHAK Tibor, MOLNAR D. Stefan, IHNATYSHYN Monika, IHNATYSHYN Adalbert Geodynamic state of the Transcarpathian inner trough based on the results of deformation monitoring observations in the region	13
KRASNIKOVA Olena, KUZMENKO Pavlo, VYZHVA Serhii Analysis of the methods of determining the brittleness index and their application for terrigenous reservoir rocks of the Dnipro-Donetsk basin	22
MENSHOV Oleksandr Fluids migration impact on soil magnetic mineralogy.....	30

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

HUBINA Viktoriia, VERKHOVTSEV Valentyn, YATSENKO Viktor, POKALYUK Volodymyr, ZABOROVSKA Larysa, LAVRYNENKO Olena, LYTVYNNENKO Yuriy Mineral and physical and chemical changes in magnetite quartites of the Valyavkinsky and Novokrivorizky deposits of the Kryvbus during their mineral processing	36
PUSHKAREV Oleksandr, SEVRUK Iryna, ZUBKO Oleksandr, DOLIN Vitaly, DEMIKHOV Yuri, SKRYPKIN Vadym Interaction of H(D,T)O with mineral adsorbents in stationary systems	49

MINERAL RESOURCES

MYKHAILOV Volodymyr Development trends of the mining industry of Ukraine in the global context.....	55
KURYLO Mariia, KOSHARNA Sofiia Strategic importance of rare earth elements for modern technologies and prospects of domestic deposits.....	63
NIKITENKO Oleksandr Stress fields and geological structure of western closure of Horlivka anticline of Donbas. Part 2. Stress and strain fields	70
LYTVYNIUK Stanislav, BARIATSKA Natalia Methodological approaches for determination and assessing the resource potential of critical raw materials in Ukraine	77

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

YEMELIANOV Volodymyr, NASIEDKIN Yevgen, IVANIK Olena, KUKOVSKA Tamara, YUKHYMCHUK Volodymyr, MYTROPHANOVA Oleksandra Distribution of macro- and micro-plastics within the beach zones of intercontinental seas (case study for Yuzhne city, Ukraine)	86
TROFYMENKO Petro, TOMCHENKO OIha, PORALO Rostyslav, ZATSERKOVNYI Vitalii, STAKHIV Iryna Remote identification of microsedimental relief forms and soil sections of agrolandscapes of the forests of Ukraine with signs of hydromorphism	98
LYUTA Natalia, SANINA Iryna Peculiarities of groundwater chemical composition in eocene and albian-cenomanian terrigenous sediments in the Dnipro basin.....	107
PANASIUK Mykola, SOSONNA Natalia, KOVALENKO Ihor, BUZYNNYI Mykhailo, SHEVCHENKO Oleksii A permanent mathematical model of filtration and migration conditions between the Prypyat and Uzh rivers of the Chornobyl exclusion zone.....	115

GEOINFORMATICS

OKHRIMCHUK Roman, DEMIDOV Vsevolod, SLIUSAR Kateryna, LUKOMSKYI Vladyslav Study on exogenous processes along the Western Coast of the Crimean Peninsula using deep learning methods.....	124
---	-----

УДК 502.58

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.01>

Олена ІВАНІК¹, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-8782-4883
e-mail: om.ivanik@gmail.com

Віктор ШЕВЧУК¹, д-р геол.-мінерал. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-7158-5016
e-mail: svgeol44@gmail.com

Любов ТУСТАНОВСЬКА¹, канд. геол. наук
ORCID ID: 000-0003-0079-2258
e-mail: ljume4@ukr.net

Катерина ГАДЯЦЬКА¹, канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0003-1334-506X
e-mail: katkravchuk@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

БЛОКОВИЙ ХАРАКТЕР НОВІТНЬОЇ ТЕКТОНІКИ СЕРЕДЬНОГО ПРИДНІПРОВ'Я НА ОСНОВІ КАРТ РІЗНИЦЬ БАЗИСНИХ ПОВЕРХОНЬ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)

Вступ. Тектонічна еволюція Середнього Придніпров'я у новітній час відрізняється особливою складністю. Представлені дослідження проводилися в межах правобережної частини Середнього Дніпра, оскільки в цьому регіоні спостерігається максимальна активізація зон неотектонічної активності, зі значними градієнтами новітніх тектонічних рухів та їх вплив на формування сучасного рельєфу, що вимагають комплексної оцінки впливу геологічних і геоморфологічних факторів на формування блокових структур.

Методи. Проведені структурно-морфометричні дослідження в межах Середнього Придніпров'я, із застосуванням методів дистанційного зондування Землі та просторово-аналітичного моделювання, дозволили визначити морфометричні показники, пов'язані з терасовими рівнями р. Дніпро, процесами глибинної ерозії, денудації та акумуляції, а також характером новітніх і сучасних тектонічних рухів.

Результати. Детальна інтерпретація різногенетичних та різнопорядкових структурно-морфометричних карт, а також поглиблений геологічний аналіз дали змогу виділити морфоструктури та блокові структури кристалічного фундаменту (регіональні блоки та локальні мікроблоки), що вирізняються диференційованістю тектонічних рухів та особливістю тектонічного розвитку.

Висновки. Реконструйовано неотектонічні умови формування та розвитку палеорельєфу Правобережжя Середнього Придніпров'я. Встановлено особливості розвитку терасових рівнів у неогеновий та четвертинний періоди. Отримані дані можуть слугувати основою для аналізу впливу тектонічних рухів на активізацію небезпечних геологічних процесів у межах Середнього Придніпров'я та прогнозу їх розвитку у майбутньому.

Ключові слова: палеорельєф, структурно-морфометричний аналіз, тектонічні рухи, глибинна ерозія, терасові рівні, морфоструктури, четвертинний період.

Вступ

Постановка проблеми. Тектонічна еволюція Середнього Придніпров'я у новітній час відрізняється особливою складністю, що певною мірою відбивається в рельєфі. Тектонічні рухи у неоген-четвертинний час мали диференційований характер, що позначилось неоднаковою інтенсивністю блокових піднятих і опускань. Водночас особливості рельєфу визначаються впливом геолого-геоморфологічних процесів та впливом антропогенного фактору. Отже, дослідження морфогенезу та прогнозування розвитку небезпечних гравітаційних і водно-гравітаційних процесів, таких як розвиток яружної ерозії, зсувів, обвалів, карстових проявів тощо, потребують комплексного застосування методів геолого-геоморфологічного аналізу. Важливе значення має структурно-морфометричний метод, який дає змогу кількісно охарактеризувати поетапний розвиток рельєфу та особливості новітніх і сучасних рухів регіону.

Раніше побудовані карти базисних, вершинних поверхонь та карти залишкового рельєфу дали змогу детально проаналізувати геоморфологічну будову району впродовж новітнього етапу його розвитку та провести геолого-геоморфологічне районування Правобережжя Середнього Придніпров'я (Ivanik et al., 2020). Разом з тим визначення різниць між поверхнями дозволяє значно розширити можливість аналізу, зокрема, в сенсі вирішення проблематики

формування та будови терасових рівнів долини Дніпра та його приток. Саме з такою метою побудовано та проаналізовано карти базисних поверхонь і карти їх різниць, що в поєднанні з комплексним аналізом даних польових досліджень дало можливість визначити етапність формування та особливості будови різновікових терас р. Дніпро.

Методи

Застосовано структурно-морфометричний аналіз, який у поєднанні з методами дистанційного зондування, ГІС-аналізу та статистичних розрахунків, надав можливість реконструювати новітню геодинамічну ситуацію регіону. Проведено польові геолого-геоморфологічні дослідження з детальним описом геоструктурного та морфоструктурного рельєфу. Для оцінки факторів сучасного тектогенезу застосовано структурно-морфометричний аналіз, а саме: графічне розчленування рельєфу на базисні поверхні, на поверхні залишкового рельєфу, на карти різниць базисних поверхонь та ерозійно-денудаційних поверхонь відповідно до порядку розташування долин та вододільних ліній.

Результати

Аналіз різнопорядкових карт базисних поверхонь та карт різниць базисних поверхонь суміжних порядків. Проводячи структурно-морфометричні дослідження Середнього Придніпров'я із застосуванням методики, описаної у роботі (Ivanik et al., 2018) для

виявлення новітніх та сучасних рухів земної кори, графічним способом було побудовано карти різниць між базисними суміжними поверхнями. Карти різниць належать до динамічних карт, завдяки яким можливо досліджувати рельєф у процесі його розвитку та оцінювати вплив різних факторів на процеси морфогенезу. Різниці між базисними поверхнями відповідають різницям висот річкових терас. Відзначається пряма залежність порядків долин із віком та кількістю терас у районах спокійного розвитку гідросітки, а також зв'язок долин нижчих порядків із швидкістю ерозії (Веклич, 1966).

За результатами польових геолого-геоморфологічних досліджень на території Середнього Придніпров'я виділено чотири надзаплавних тераси четвертинного періоду (Звіт..., 2007). Графічним відніманням отримано вісім карт різниць базисних поверхонь суміжних порядків (надалі будемо їх іменувати як карти різниць). Різниці між поверхнями бувають як додатними, так і від'ємними. Додатні різниці свідчать про піднімання земної поверхні, а від'ємні виникають у разі її опускання. До такого ж ефекту призводить зниження базису ерозії та його підняття, а також вплив деяких інших факторів рельєфотворення (Ivanik et al., 2019).

Окрім того, загалом було побудовано 35 різновисотних, різнопорядкових та різнонаправлених структурно-морфометричних карт. Отримані дані спрямовані на проведення детального аналізу геолого-геоморфологічної будови району, реконструкції терасових рівнів долини Дніпра, моніторингу блокових структур та прогнозу оцінки небезпечних процесів району.

У подальшій інтерпретації отриманих результатів досліджень аналіз буде проведено від сучасного стану рельєфу до більш давнього. Такий підхід дозволить більш детально охарактеризувати відомості щодо формування палеорельєфу, оскільки зміни останнього періоду добре відображаються у сучасному рельєфі.

Середнє Придніпров'я характеризується багатоярусною геологічною будовою, у якій беруть участь водовмісні та водотривкі товщі. У континентальному геологічному розвитку району виділено три періоди: доверхньокрейдяний, неогеновий і четвертинний (Максимович та ін., 2005). Сучасний рельєф досліджуваної території сформований упродовж двох останніх періодів. Вирішальну роль у його формуванні відігравали неотектонічні блокові рухи земної кори та зміни кліматичних умов, особливо в четвертинну епоху (Звіт..., 2007).

За матеріалами геологічної зйомки та тематичних досліджень встановлено наявність трьох терасових рівнів у межах Київського блоку та чотирьох – у межах Канівсько-Трахтемирівського блоку (Information report ..., 2013). Водночас аналіз раніше побудованих карт різниць дав змогу простежити можливість існування зруйнованих терасових рівнів палеорельєфу в межах усіх виділених комплексів.

Для реконструкції палеорельєфу залучено комплекс морфометричних карт різного спрямування, зокрема, карти базисних поверхонь та карти різниць між суміжними базисними поверхнями, у зіставленні з даними фактичних матеріалів та польових досліджень. За основу було взято базисні поверхні, що відповідають певним стадіям розвитку палеорельєфу, із прив'язкою до карт різниць та посиланням на фактичний матеріал. Такий аналіз дав змогу продемонструвати зміну характеру рельєфу як під дією ерозійно-денудаційних факторів, так і під впливом тектонічного чинника.

Отримані карти базисної поверхні 1-го порядку не інтерпретувалися, оскільки вони мало чим відрізняються від сучасного рельєфу, хоча графічно вони використовувалися у подальших побудовах.

За аналізом висотних показників карт базисних поверхонь 2-го та 3-го порядків визначено однакові мінімальні

висоти базису ерозії (80 м), що свідчить про відносну тектонічну стабільність регіону, хоча діапазон показників у межах досліджуваного району змінюється неоднаково. За характером змін цих показників виділяються три райони (блоки): північний (Київський), середній (Обухівський) та південний (Канівсько-Трахтемирівський). Перерва у тектонічних рухах є індикатором формування I надзаплавної тераси у верхньонеоплейстоценовому часі. На різних блоках ерозійно-денудаційні процеси (врізання долин, вирівнювання схилів) відбуваються з неоднаковою активністю (рис. 1).

Подальший аналіз динаміки кожного окремо взятого блоку у певний період часу, починаючи з пізнього неоплейстоценового часу, демонструє таке.

Палеорельєф Київського блоку за висотними показниками (215 м) займає нижче положення в рельєфі щодо Канівсько-Трахтемирівського (255 м). За матеріалами польових досліджень у межах Київського блоку перша надзаплавна тераса, сформована у пізньочетвертинний час, простежується у вигляді вузької смуги вздовж правого борту долини Дніпра. Потужність алювіальної товщі тераси, що залягає на мергелях київської світи, сягає 15–20 м. Абсолютні позначки поверхні тераси – 110–115 м. Правобережні схили долини р. Дніпро високі й круті, з кутами нахилу місцями понад 60° і перевищенням над руслом ріки 65–105 м (Грубрин, & Палиєнко, 1976). Накладання на отриманий палеорельєф даних геологічної зйомки ілюструє морфологічне розташування I надзаплавної тераси на палеорельєфі цього блоку. Тут вона залягає на висотах 110–125 м на схилах долин річок Ірпін та Либідь. Інтерпретуючи отримані дані, можна припустити, що на таких самих висотах вона могла бути збереженою і на інших ділянках цього блоку на виположених схилах, особливо у долині р. Ірпін, яка має вигляд трогової долини (рис. 1).

Палеорельєф цього часу в межах Обухівського блоку, що займає проміжне положення між Київським і Канівсько-Трахтемирівським, має незначні морфоструктурні зміни. Тут перша надзаплавна тераса картується у долині річок Стугна та Красна. На карті базисної поверхні 2-го порядку тераса фіксується на висоті 115–130 м, за гіпсометричним положенням вона на 5–10 м вище щодо її залягання в межах Київського блоку. Ділянки збереженої тераси на півночі цього блоку спостерігаємо у долині р. Стугна на виположених схилах. На південному напрямку вона збережена частково, закартована невеликими ділянками у р. Красна, можливо це пояснюється розташуванням на краю блоку з додатковими агентами впливу. Загалом різновисотне залягання терас у рельєфі простежується в межах кожного блоку.

У межах Канівсько-Трахтемирівського блоку I надзаплавна тераса (борова) закартована по всій долині лівобережного Дніпра, на абсолютних відмітках до 120 м, відносно її перевищення над рівнем р. Дніпра сягає 8–15 м. Тераса складена пісками молодого-шекснинського та осташківського горизонтів (пізній вюрм) (Грубрин, & Палиєнко, 1976), що відповідає верхньому неоплейстоцену за сучасною стратиграфічною схемою четвертинних відкладів України. На Правобережжі Середнього Придніпров'я на цьому блоці вона частково закартована лише у долині р. Росава у вигляді видовжених ліній локального характеру на висотах 99–118 м. На інших ділянках цього блоку вона відсутня, можливо була зруйнована або похована, оскільки територія блоку досить розчленована (перевищення становить 160 м) і характеризується своєрідним поєднанням лускувато-насувної морфології із блоковою структурою, що сприяє розвитку денудаційних процесів. Врахувавши всі ці особливості, можна допустити, що I надзаплавна тераса в межах цього блоку могла існувати на відзначених висотах (рис. 1).

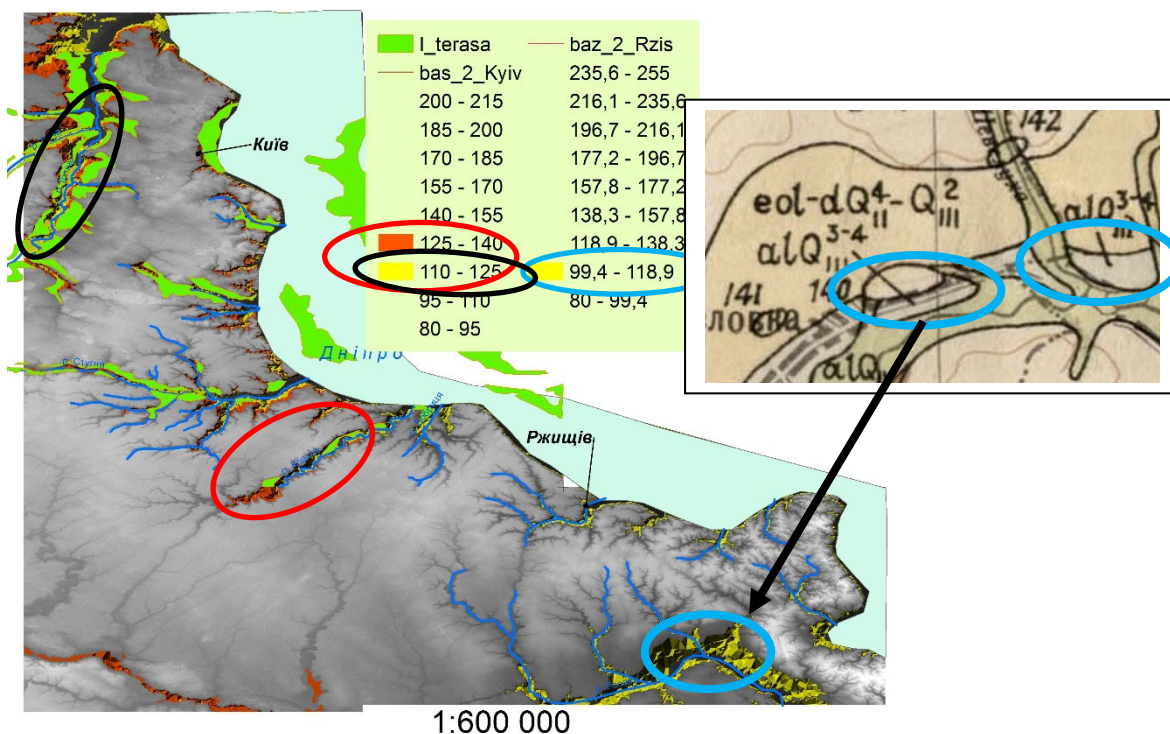


Рис. 1. Карта базисної поверхні 2-го порядку Правобережжя Середнього Придніпров'я та ділянки залягання I надзаплавної тераси

Отже, у пізньому неоплейстоцені у палеорельєфі Правобережжя Середнього Придніпров'я спостерігаються незначні диференційовані зміни блокових структур. Київський блок має тенденцію до незначних тектонічних змін, які супроводжуються ерозійно-денудаційною діяльністю. Прикладом можуть слугувати ділянки біля с. Нові Петрівці. На цій ділянці рисунок долин відзначається глибокими ерозійними врізами, руйнуванням масивних вододілів та перетворенням їх у досить вузькі смуги, а в деяких місцях – у систему останців. Такі умови та геологічна будова блоку зумовлюють виникнення ерозійно-денудаційних та схилових процесів зсувного характеру. Велика кількість зсувів ускладнює морфологію дніпровських схилів, складених палеогеновими породами суглинкового складу та лесовими формаціями, які залягають на бортах сучасних ярів і балок та на схилах долин річок, особливо в Київському регіоні. Обухівський та Канівсько-Трахтемирівський блоки зазнають незначних змін, що проявлені у вирівнюванні рельєфу та малоамплітудних блокових переміщеннях.

Зіставлення карт базисних поверхонь 3-го та 4-го порядків демонструє певною мірою зворотну направленість блоків. У цей час Київський блок зберігає незмінні мінімальні (85 м) та максимальні (210 м) висоти, це свідчить про сталість тектонічного режиму, що сприяє формуванню другої надзаплавної тераси. За польовими дослідженнями друга надзаплавна тераса добре простежується на лівому березі Дніпра, а на правому – відомі лише окремі її фрагменти між гирлом Совської балки та Лисої гори. Висота тераси над руслом сягає 20–25 м. Загальна товщина алювію тераси сягає 25 м. Вона картується вздовж усієї долини р. Ірпін (Грубрин, & Палиєнко, 1976). Карта базисної поверхні 3-го порядку відображає її положення на схилах палеорельєфу на висотах 140–154 м. Друга тераса розташовується на 28–30 м вище від першої, що може свідчити про значні підняття в пізньому неоплейстоцені з одночасною активізацією ерозійно-денудаційних процесів.

Положення другої тераси в межах Обухівського блоку за картою базисної поверхні 3-го порядку

фіксується на пологих правобережних схилах р. Стугна на висотах 126–140 м, що на 10–11 м вище, ніж положення першої тераси (рис. 2). Відносно Київського блоку вона лежить на 14 м нижче по схилу. Різновисотне залягання тераси свідчить про неоднаковий режим тектонічних рухів блоків, своєрідну морфологію рельєфу та вплив додаткових екзогенних факторів.

Канівсько-Трахтемирівський блок того часу мав своєрідний розвиток, зокрема фіксується незначне зниження базису ерозії 3-го порядку на 5 м. Амплітуда перевищень тут сягає понад 100 м. Яружна система активно розвивається, змінюючи морфологічний вигляд вододільних просторів. Такі процеси формують нові морфоскульптури з досить крутими схилами (рис. 2). За матеріалами геологічної зйомки друга надзаплавна тераса в межах цього блоку картується на обох бортах долини Дніпра. В районі м. Канева її абсолютні відмітки сягають 95–100 м, а в районі с. Яблунів – вона розташована на висотах 115–125 м (Грубрин, & Палиєнко, 1976). За морфометричними даними тераса фіксується на висотах палеорельєфу 118–138 м (рис. 2). На території цього блоку таких ділянок з невеликими площами чимало. Проявлені вони на схилах долин яружної системи та долини р. Росава. Фрагментарність проявів другої тераси цього блоку пояснюється, вірогідно, високою дислокованістю порід у льодовиковий період.

Отже, друга надзаплавна тераса в межах Київського та Обухівського блоків збереглася досить значними за площами ділянками, на відміну від Канівсько-Трахтемирівського блоку, де вона фіксується у вигляді невеличких лінійоподібних фрагментів.

Наступна III надзаплавна тераса формувалася у післяльодовиковий час, частково збереглася і має різне геоморфологічне положення на правобережжі р. Дніпро. Аналізуючи карти базисних поверхонь 4-го та 5-го порядків, слід акцентувати увагу на незмінності базису ерозії на обох картах, що свідчить про подібність тектонічних режимів упродовж льодовикового та післяльодовикового періодів.

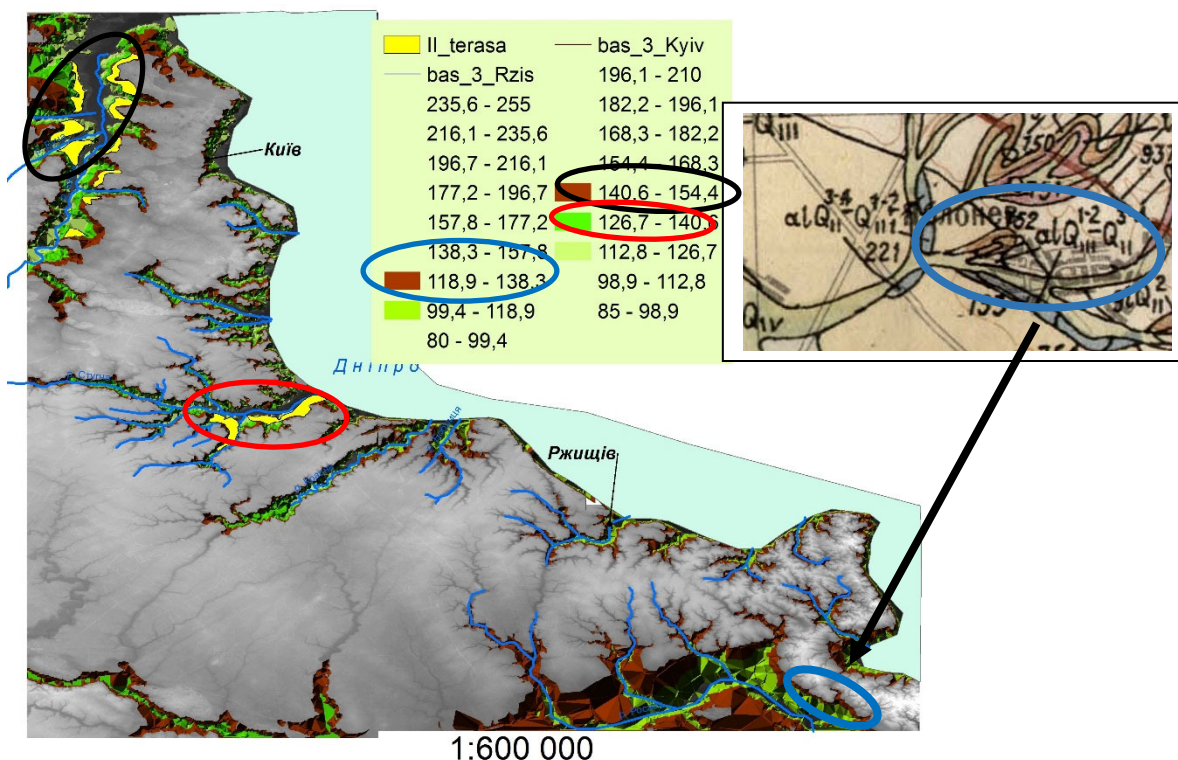


Рис. 2. Карта базисної поверхні 3-го порядку Правобережжя Середнього Придніпров'я та ділянки ймовірного положення II надзаплавної тераси

У межах Київського блоку III тераса за даними польових досліджень простежується фрагментарно. Вона закартована на двох ділянках цього блоку: неподалік від с. Нові Петрівці та у верхів'ях правобережжя р. Ірпін. За даними карти базисної поверхні 4-го порядку вона фіксується на висотах 154–168 м палеореельєфу (рис. 3). Третя тераса залягає на 14 м вище від другої, що майже вдвічі менше висотних показників між I та II терасами. Це свідчить про незначні висхідні рухи цього часу. Скрізь на поверхні тераси простежуються сліди ерозійного розчленування, що доводить післяльодовиковий період її формування. Флювіогляціальні процеси сприяли швидкому руйнуванню рельєфу, змінюючи його морфологічний вигляд та формуючи відповідні генетичні типи відкладів. За визначеними висотами можна припустити ймовірне формування цієї тераси і на інших ділянках блоку.

У межах Обухівського блоку III надзаплавна тераса з незначною площею закартована лише у долині р. Красна. Вона формувалася на обухівській світі палеогену, що представлена алевритами глауконіто-кварцового складу, а у підшві – крем'янистими, безкарбонатними пісковиками. За морфометричним аналізом її зафіксовано на висотах 140–154 м. Палеореельєф блоку того часу відзначався значною розчленованістю, річкові долини характеризувалися крутими схилами і часто мали вигляд трогових долин із руйнуванням більшої частини третьої тераси (рис. 3).

III надзаплавна тераса в районі Канівсько-Трахтемирівського блоку закартована лише на лівобережжі р. Дніпра. На правобережжі вона відсутня, оскільки її перебудова відбувалась у післяльодовиковий час під впливом флювіогляціальних процесів. Деструктивні процеси льодовикового періоду відзначилися формуванням лускувато-насувних структур з ін'єктивними формами саме в межах цього блоку, що значно вплинуло

на інтенсифікацію ерозійно-денудаційних процесів. За відсутності даних щодо існування III надзаплавної тераси в межах цього блоку, завдяки морфометричним даним можна припустити її формування на висотах 125–143 м (рис. 3).

Отже, III надзаплавна тераса має різновисотне залягання в рельєфі в межах блоків, що характеризує різну динаміку кожного окремого блоку. Також слід зауважити, що на морфоструктурний вигляд регіону великий вплив мав дніпровський льодовик, який розчленував вже сформовану на той час ерозійну систему, по якій розвинулась сучасна річкова та яружно-балкова мережі. Період зледеніння та післяльодовикового часу характеризувався тривалим стабільним тектонічним режимом та інтенсивним розвитком ерозійних процесів.

Підсумовуючи проведений аналіз карт базисних поверхонь 5–2-го порядків, слід відзначити перервний характер тектонічних рухів у післяльодовиковий період, які вплинули на формування трьох надзаплавних терас долини р. Дніпро і річок Росава, Стугна, Красна, Бобриця та Ірпін, які мали розгалужені системи.

За фактичними матеріалами IV надзаплавна тераса в межах Середнього Придніпров'я картується на лівобережжі р. Дніпро, на абсолютних висотах 125–142 м. Вона проявлена невеличкими лінзами в межах Канівсько-Трахтемирівського блоку, де її фрагменти у вигляді алювію іршанської світи ранньочетвертинного віку фіксуються у лускувато-насувних структурах на абсолютних висотах 180 м (Грубрин, & Палієнко, 1976). На основі проведених польових досліджень зафіксовано відклади іршанської світи у складках дислокованих порід у гирлах Костянецького та Хмільного ярів Канівського блоку та в лускувато-насувних структурах біля с. Бобриця Трахтемирівського блоку. На карті базисної поверхні 6-го порядку відзначаються ділянки з різновисотним заляганням тераси. Рельєф того часу порівняно із

сучасним невисокий (у середньому 160 м), лише в районі с. Гребені вододільні простори з висотами 168–185 м підступають до схилу долини Дніпра, утворюючи

специфічний мікро- та мезорельєф у вигляді невисоких уступів. Така морфологія схилів призводить до розвитку малоамплітудних обвальних процесів.

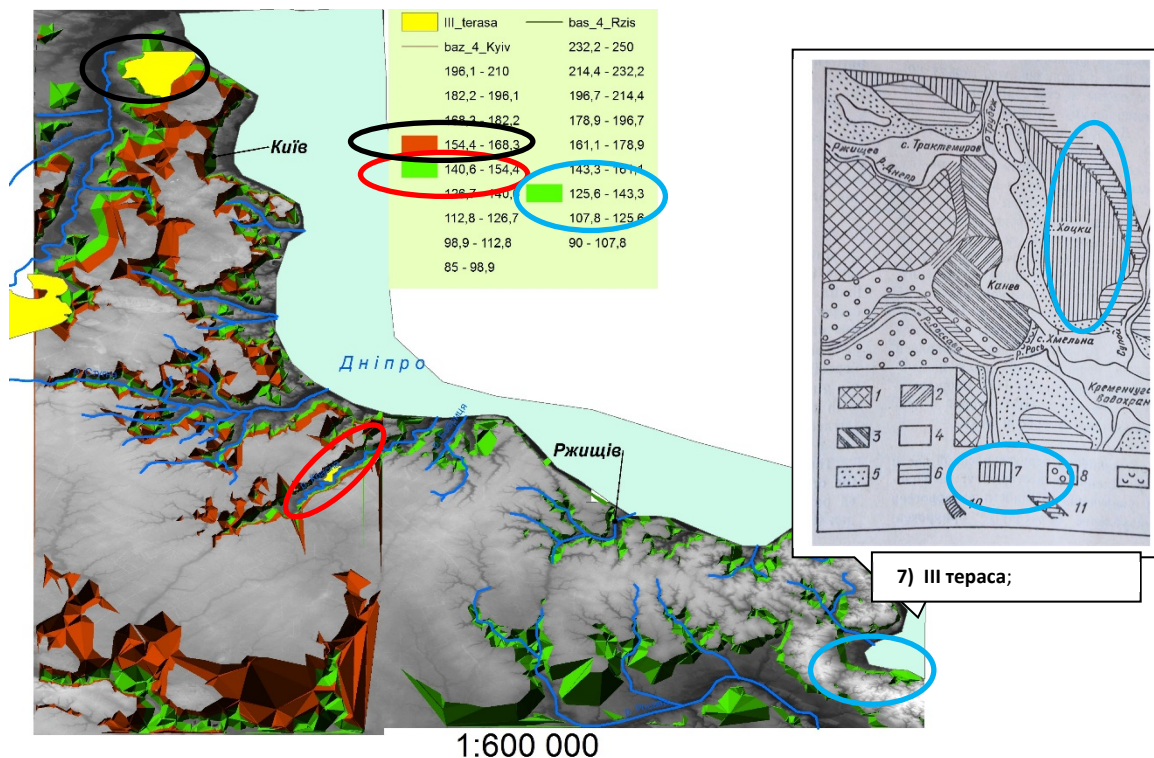


Рис. 3. Карта базисної поверхні 4-го порядку Правобережжя Середнього Придніпров'я та ділянки ймовірного положення III надзаплавної тераси

Отже, IV надзаплавна тераса є найдавнішою структурою, зруйнованою впродовж четвертинного періоду в результаті впливу різногенетичних ерозійно-денудаційних процесів, у тому числі льодовикових.

Більш ранні процеси зафіксовані на картах базисних поверхонь 7–9-го порядків. Відзначається закладання річкових долин вищих порядків по зонах регіональних розломів та їх приуроченість до нижнього структурного ярусу платформного чохла. У рисунку базисних поверхонь та їх різновидів вищих порядків добре виділяються консолідовані структури (блоки), які залежать від величини різниці геопотенціалів у глибокозалеглих структурах. Новітні рухи земної кори значно збільшують різницю геопотенціалів і тим самим зумовлюють більш чітке відображення стійких структур на морфометричних картах (Ivanik et al., 2019).

Зіставлення блоків за тектонічними режимами здійснювалось за картами різниці суміжних базисних поверхонь (різниця між висотами показників поверхонь) вищих (6–8-го) порядків. Усереднені різниці між 5-м і 6-м та між 6-м і 7-м порядками однакові і змінюються в діапазоні від +70 м до –70 м, що свідчить про тектонічну стабільність регіону.

За вищезазначеним описом морфометричних карт було виділено три блоки, які в цілому є неоднорідними. Існує думка стосовно виділення четвертого блоку, який зосереджений між Обухівським та Канівсько-Трахтемирівським блоками, його можна віднести до району пгт Ржищів. Здебільшого всі блоки розмежовуються розломами. Більше того, кожен із цих блоків поділяється на менші фрагменти (мікроблоки) (рис. 4).

У Київському блоці виділяються фрагментовані ділянки, так звані мікроблоки, що мають північно-західне простягання. В Обухівському блоці мікроблоки мають

північне простягання, що збігається з напрямком р. Дніпро, хоча в межах цих блоків морфологічні фрагменти мають різне орієнтування, яке слабо проявлене в їхньому видовженні. Геологічною межею між Київським та Обухівським блоками є Глеваський розлом. На цьому фоні Канівсько-Трахтемирівський блок вирізняється дещо різнонаправленою орієнтацією мікроблоків. Таке їх положення певним чином узгоджується з лускуватонасунувими дислокаційними структурами та активним впливом льодовика.

У кожному блоці виділяється по декілька мікроблоків із певним орієнтуванням. На території Київського блоку виділено чотири фрагментарні ділянки: підняття, що просторово відповідає Печерському горсту; на півночі від нього розташований мікроблок Нові Петрівці; південніше виділяється третій мікроблок, обмежений Київським розломом; четвертий блок обмежується Глеваським розломом і зорієнтований у північно-західному напрямку (рис. 4) (Information report..., 2013).

Геологічними межами між блоками умовно є гідрографічна сітка, яка іноді успадковує розломи, та серія тріщин, які також можуть розділяти окремі морфоструктури.

У межах Обухівського блоку виділяються чотири фрагментарні ділянки (мікроблоки). На півдні фіксується Витачівський мікроблок, складений гранітами і мігматитами уманського комплексу. Паралельно до нього розташовуються три мікроблоки подібного орієнтування (рис. 4).

На Канівсько-Трахтемирівському блоці виокремлено три мікроблоки, два з яких успадкували Канівський і Трахтемирівський горсти, які розділені Трошинським грабенем і орієнтовані в північному напрямку вздовж долини р. Дніпро. Третій мікроблок має вище гіпсотетричне положення й обмежується з півдня долиною р. Росава (рис. 4).

Карти різниць найвищих 7-го та 8-го порядків характеризують більш ранні стадії морфогенезу та тектогенезу Середнього Придніпров'я (рис. 5). Відмінності будови блокових структур Київського блоку засвідчують диференційований характер рухів у кінці неогенового – початку четвертинного періодів. Обухівський блок характеризується відносно спокійним тектонічним режимом

упродовж усього періоду неотектонічного розвитку. Відмінним є характер тектонічної еволюції Канівсько-Трахтемирівського блоку, який характеризується менш інтенсивними деформаційними процесами новітнього тектогенезу, оскільки в кінці неогенового періоду амплітуда тектонічних рухів північно-східної частини Українського щита була більшою, ніж південно-західної (рис. 5).

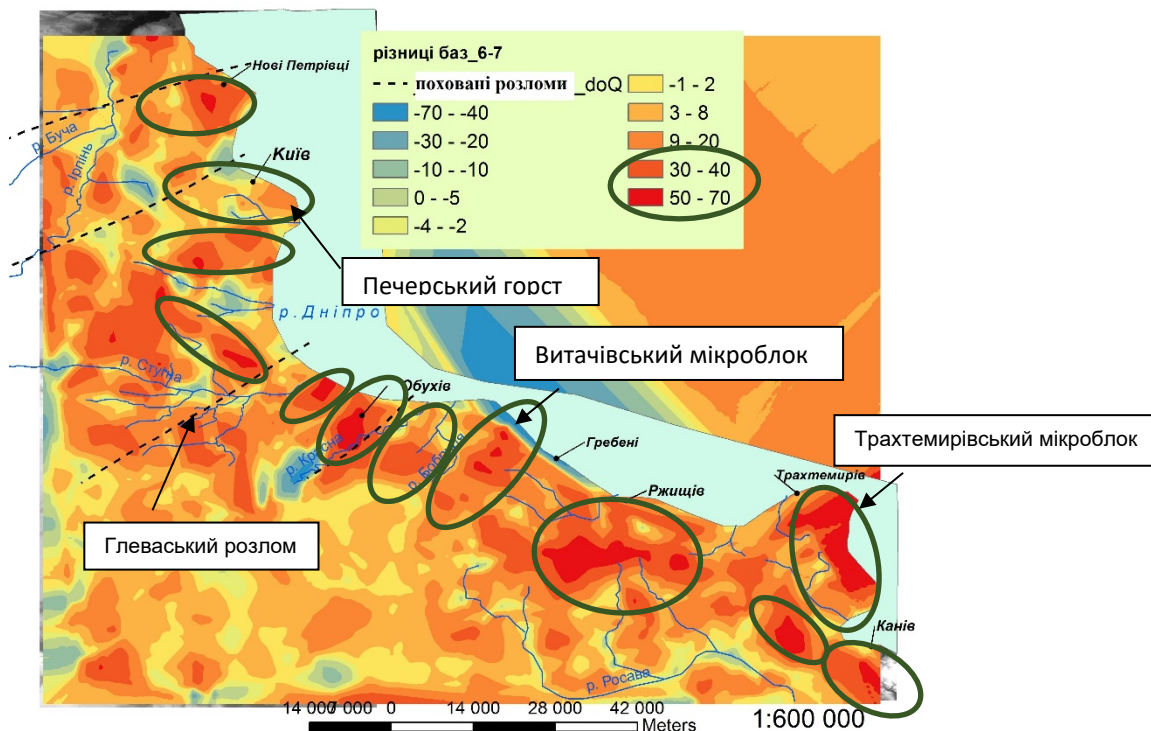


Рис. 4. Карта різниць між базисною поверхнею 6-го порядку та базисною поверхнею 7-го порядку, Середнє Придніпров'я

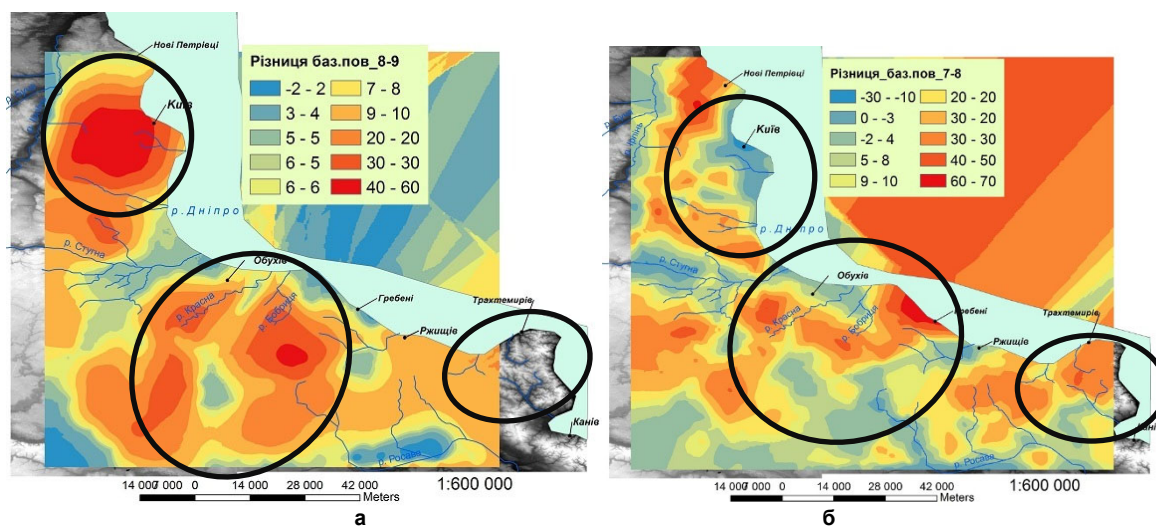


Рис. 5. Карта різниць базисних поверхонь 8-го (а) та 7-го (б) порядків, Середнє Придніпров'я

Отже, аналіз карт різниць базисних поверхонь найвищих порядків дав змогу виконати регіональне та локальне тектонічне районування Середнього Придніпров'я. На фоні виділених тектонічних блоків фіксується низка дрібних блокових структур (мікроблоків), які добре відображені у морфоструктурному плані регіону. Реконструйовано неотектонічну еволюцію регіону, для якої характерна диференційована зміна тектонічних рухів у межах кожного із блоків. Саме нерівномірність рухів у цих блоках призводить до неоднорідності ступеня денудації їх поверхонь.

Дискусія і висновки

Інтерпретація даних, отриманих у результаті структурно-морфометричного аналізу та геологічних досліджень дала змогу реконструювати умови неотектонічного розвитку регіону та визначити характерні ознаки прояву процесів текто- та морфогенезу. Встановлено значний вплив диференційованих неотектонічних рухів на формування основних елементів рельєфу. На основі отриманих даних визначено особливості неотектонічної еволюції блокових структур та морфоструктур різних

типів, їх зв'язок між терасовими рівнями та тектонічними рухами впродовж четвертинного періоду. Зафіксовано перервні динамічні ритми в післяльодовиковий час і спокійний тектонічний режим упродовж дольодовикового (ранній плейстоцен) часу. Проаналізовано будову та еволюцію річкових долин Середнього Придніпров'я та їхніх окремих елементів. Зафіксовано висотне положення надзаплавних терас на кожному тектонічному етапі розвитку, визначено їх геологічну будову та геоморфологічні особливості. Детальна інтерпретація різногенетичних та різнопорядкових структурно-морфометричних карт, а також геологічний аналіз дали змогу виділити морфоструктури та блокові структури кристалічного фундаменту, серед яких фіксуються регіональні (блоки) та локальні (мікроблоки) структури, що вирізняються диференційованістю тектонічних рухів та особливістю тектонічного розвитку. На основі аналізу отриманих даних реконструйовано характер ерозійно-денудаційної діяльності окремих ділянок регіону.

Внесок авторів: Олена Іванік – написання (перегляд і редагування); Віктор Шевчук – концептуалізація, валідація даних; Любов Тустановська – методологія, написання (оригінальна чернетка), формальний аналіз; Катерина Гадяцька – аналіз літературних джерел.

Список використаних джерел

- Веклич, М. Ф. (1966). *Палеогеоморфологія області Українського щита (мезозой і кайнозой)*. Наукова думка.
- Грубрин, Ю. Л., & Палієнко, Є. Т. (1976). *Сучасні геоморфологічні процеси на території Середнього Придніпров'я*. Наукова думка.
- Звіт про інженерно-геологічне та геофізичне вивчення (2007). Інженерно-геологічне довідчення території Київської, Чернігівської, Житомирської та Закарпатської областей з метою геологічного обґрунтування протизсувних заходів та геологічного забезпечення УІАС НС. Міністерство охорони навколишнього середовища України Державна геологічна служба Північне державне регіональне геологічне підприємство "Північгеологія" Центр гідрогеологічних та геолого-екологічних досліджень. Центр геофізичних досліджень. Кн. 1. <https://drive.google.com/file/d/1ArhRJam21JvtHt5439DgIobyc8AH8AQO/view>
- Максимович, В. Ю., Кузнецова, В. Г., Вербицький, Т. З., Білінський, А. І. та ін. (2005). *Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат*. Наукова книга.
- Information report on NDR № 04/2013 (2013). Development of draft Regulations on the landslide regime and the Concept of stabilization of landslide processes on the territory of Kyiv. National Academy of Sciences of Ukraine DU Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine. https://drive.google.com/file/d/1NVjnekvlaNoE_kxNf_qeQRfOxhuO-Dm/_view

Olena IVANIK¹, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8782-4883
e-mail: om.ivanik@gmail.com

Viktor SHEVCHUK¹, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-7158-5016
e-mail: svgeol44@gmail.com

Lyubov TUSTANOVSKA¹, PhD (Geol.)
ORCID ID: 000-0003-0079-2258
e-mail: ljume4@ukr.net

Kateryna HADIATSKA¹, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-1334-506X
e-mail: katkravchuk@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

THE BLOCK CHARACTER OF THE RECENT TECTONICS OF THE MIDDLE DNIEPER BASIC MAPS DIFFERENCES OF BASE SURFACES

Background. The tectonic evolution of the Middle Dnipro region in modern times is particularly complex. The presented studies were conducted within the right-bank part of the Middle Dnipro, since the maximum activation of neotectonic activity zones is observed in this region, with significant gradients of the latest tectonic movements and their impact on the formation of the modern relief, that require a comprehensive assessment of the impact of geological and geomorphological factors on their formation.

Methods. Structural and morphometric studies within the Middle Dnipro region, using remote sensing methods and spatial-analytical modeling, allowed us to determine morphometric parameters related to the terraced levels of the Dnipro River, the processes of deep erosion, denudation and accumulation, as well as the nature of recent and modern tectonic movements.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., & Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177–186. <https://doi.org/10.12911/22998993/102964>.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Lavrenyuk, M., & Ivankevich, G. (2018). Regional and local forecasting of landslides and debris flows and assessment of their impact on infrastructure objects. *Abstracts of 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13–16 Nov. 2018, Kyiv, Ukraine. <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91316>

Ivanik, O. M., Shevchuk, V. V., Tustanovska, L. V., Hadiatska, K. P., & Volkova, S. G. (2020). Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric method. *International Conference Geoinformatics 2020, 11–14 May 2020, Kiev*.

References

- Grubryn, Ju. L., & Palienko, E. T. (1976). *Recent geomorphological processes of the Middle Dnieper area*. Naukova dumka [in Ukrainian].
- Information report on NDR № 04/2013 (2013). Development of draft Regulations on the landslide regime and the Concept of stabilization of landslide processes on the territory of Kyiv. National Academy of Sciences of Ukraine DU Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine. https://drive.google.com/file/d/1NVjnekvlaNoE_kxNf_qeQRfOxhuO-Dm/_view
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., & Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177–186. <https://doi.org/10.12911/22998993/102964>.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Lavrenyuk, M., & Ivankevich, G. (2018). Regional and local forecasting of landslides and debris flows and assessment of their impact on infrastructure objects. *Abstracts of 11th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 13–16 Nov. 2018, Kyiv, Ukraine. <http://www.earthdoc.org/publication/publicationdetails/?publication=91316>
- Ivanik, O. M., Shevchuk, V. V., Tustanovska, L. V., Hadiatska, K. P., & Volkova, S. G. (2020). Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric method. *International Conference Geoinformatics 2020, 11–14 May 2020, Kiev*.
- Maksymovich, V. Yu., Kusnecov, V. G., Verbickiy, T. Z., Bylinskiy, A. I. et al. (2005). *Study of modern geodynamics of the Ukrainian Carpathians*. Naukova kniga [in Ukrainian].
- Report on engineering-geological and geophysical study (2007). Engineering and geological study of the territory of Kyiv Chernihiv, Zhytomyr and Zakarpattia regions in order to geological substantiation of landslide measures and geological support of UIAS NA. Ministry of Environmental Protection of Ukraine State Geological Survey Northern State Regional Geological Enterprise "Northern Geology" Center for Hydrogeological and Geological and Ecological Research. Center for Geophysical Research. Book 1 [in Ukrainian]. <https://drive.google.com/file/d/1ArhRJam21JvtHt5439DgIobyc8AH8AQO/view>
- Veklich, M. F. (1966). *Palaeomorphology of the Ukrainian Shield region (Mesozoic and Cenozoic)*. Naukova dumka [in Ukrainian].
- Отримано редакцією журналу / Received: 15.06.23
Прорецензовано / Revised: 09.09.24
Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

R e s u l t s . *Detailed interpretation of multi-genetic and multi-order structural and morphometric maps, as well as in-depth geological analysis, allowed us to identify morphostructures and block structures of the crystalline basement (regional blocks and local microblocks), which are distinguished by differentiated tectonic movements and peculiarities of tectonic development.*

C o n c l u s i o n s . *The neotectonic conditions of formation and development of the paleorelief of the Right Bank of the Middle Dnieper are reconstructed. The peculiarities of the development of terraced levels in the Neogene and Quaternary periods are established. The obtained data can serve as a basis for analyzing the influence of tectonic movements on the activation of hazardous geological processes within the Middle Dnieper region and forecasting their development in the future.*

K e y w o r d s : *paleo-relief, structural and morphometric analysis, tectonic movements, deep erosion, terrace levels, morphostructures, Quaternary period.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.34

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.02>

Василь ІГНАТИШИН^{1,2}, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., доц.
ORCID ID: 0000-0003-0727-2132
e-mail: rgstrs1962@i.ua

Дмитро МАЛИЦЬКИЙ³, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-9156-739x
e-mail: dmalytsky@gmail.com

Тібор ІЖАК^{2,3}, канд. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-0940-8947
e-mail: tiboras@kmf.uz.ua

Стефан МОЛНАР Д.^{2,3}, канд. географ. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-2959-9136
e-mail: molnar.d.istvan@kmf.org.ua

Моніка ІГНАТИШИН¹, пров. інж.
ORCID ID: 0009-0000-0154-282x
e-mail: sitkomonika@i.ua,

Адальберт ІГНАТИШИН¹, інж. II кат.
ORCID ID: 0009-0002-8597-2417
e-mail: Adalbert_Ihnatisin@i.ua

¹Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

²Закарпатський угорський інститут ім. Ференца Ракоці II, Берегове, Україна

³Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

ГЕОДИНАМІЧНИЙ СТАН ЗАКАРПАТСЬКОГО ВНУТРІШНЬОГО ПРОГИНУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДЕФОРМОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У РЕГІОНІ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Вступ. Актуальність проведених досліджень викликана поступовим зростанням місцевої сейсмічності в регіоні, який займає своєрідне географічне положення, через який пролягають нафто-, газо- та продуктогонні, на території якого розташовані об'єкти критичної інфраструктури, що можуть потерпати в результаті дії підземної стихії. Важливо мати інформацію про рухи верхніх шарів земної кори, їх кінематику та динаміку, які суттєво впливають на напружено-деформований стан порід, вивільнення енергії геомеханічних процесів. Також необхідно дослідити вплив геодинаміки регіону на розрядку напружено-деформованого стану порід.

Методи. Методика дослідження полягає в побудові залежностей зміщень земної кори від часу, порівняння швидкостей та прискорень рухів кори в інтервалах аномальних сучасних горизонтальних рухів кори. Розраховано швидкості та прискорення рухів кори, проведено порівняння кінематики рухів та сейсмічності регіону. Застосовано кореляційний аналіз спостережуваних рядів. Для вирішення поставлених завдань використано результати спостережень горизонтальних рухів кори в зоні Оаиського глибинного розлому за допомогою кварцового деформометра базою 24,5 м, змонтованого в штольні смт Королеве. Відомості про сейсмічний стан отримано за допомогою цифрових сейсмометрів, які функціонують на режимних геофізичних станціях Відділу сейсмічності Карпатського регіону та Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

Результати. Розглянуто геодинаміку Закарпатського внутрішнього прогину на основі спостережень сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оаиського глибинного розлому, які за 2021 рік представлені розширеннями порід величиною $+12,61 \times 10^7$. Проведено розрахунок фізичних параметрів георухів у регіоні та встановлено просторово-часовий розподіл місцевої сейсмічності, досліджено зв'язки сейсмічного та геодинамічного станів у Закарпатті за 2021 рік. Вивчено варіації зміщень верхніх шарів земної кори за весь період спостережень на пункті деформометричних спостережень у смт Королеве (1999–2021 рр.) та часовий розподіл місцевих підземних поштовхів.

Висновки. Аналіз просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності та сучасних горизонтальних рухів кори за весь період деформометричних спостережень у зоні Оаиського глибинного розлому вказав підвищення сейсмічності регіону в інтервалах інтенсивних рухів кори та наявність періодів коливання рухів кори тривалістю в 12 років: серед яких 2–3 роки виявлено знакозмінні процеси (розширення та стиснення порід, загальна величина зміщення коливається в області нульових рухів). Найбільш актуальним та важливим є періоди тривалістю 9–10 років, що йдуть за цими інтервалами затишся, оскільки в цей час реєструються підземні поштовхи, також встановлено, що частота їх зростає. Активізація сейсмічності регіону спостерігається на фоні загального розширення порід, що відбувається за сталих вікових рухів кори. На сучасному етапі сучасні рухи кори перебувають у стані розширення порід, якщо така тенденція не зміниться, слід очікувати підвищення сейсмічності в регіоні.

Ключові слова: деформограф, сучасні горизонтальні рухи кори, швидкість рухів кори, прискорення зміщень порід, геодинамічний стан, землетруси, місцева сейсмічність, сейсмотектонічні процеси, Оаиський глибинний розлом.

Вступ

Екологічний стан Закарпаття важливо розглядати і в плані впливу на нього сейсмотектонічних процесів у регіоні. Незважаючи на помірну сейсмічність Закарпатського внутрішнього прогину: реєстрацію одиноких відчутних підземних поштовхів на фоні численних малопотужних землетрусів в інтервалі річних вікових ходів сучасних

горизонтальних рухів кори та річних спостережень на деформометричних станціях, важливо проведення дослідження характеру рухів кори та розрахунок фізичних параметрів, що ці рухи описують. Закарпаття особливе тим, що тут на геологічних структурах тривалий час проводяться спостереження за сучасними горизонтальними рухами кори. Історія вимірювання деформацій

земної кори в регіоні триває з 80-х рр. XX ст. Тут багато років функціонували паралельно декілька горизонтальних деформометричних станцій: "Берегове-1", "Берегове-2", "Королеве". Деформометричні станції "Берегове-2" та "Королеве" працюють і сьогодні. Сейсмічність Закарпаття активізується в періоди інтенсивних рухів кори, виміряних на пункті деформографічних спостережень "Королеве". Аналіз деформометричних вимірювань показав, що рухи кори в Закарпатському внутрішньому прогині мають успадкований характер, розрахунок сучасних горизонтальних рухів кори підтвердив отримані раніше результати за допомогою інших геофізичних і геодезичних методів: загальне розширення кори з величиною вікового ходу $+10 \times 10^{-7}$. Попередні дослідження геодинаміки регіону вказали на кореляцію періодів інтенсивних рухів кори та проявів місцевої сейсмічності. Застосування фізичних параметрів геомеханічних рухів дало змогу відмітити зв'язок геодинамічного та сейсмічного станів регіону. Оскільки деформографічні спостереження в зоні Оашського глибинного розлому проводяться безперервно тривалий час, накопичено базу даних зміщень земної кори починаючи від 1999 р., то актуальним є продовження моніторингу сучасних горизонтальних рухів кори. Результати дослідження потрібні для комплексного вирішення екологічних проблем краю, зокрема їх геологічних аспектів. Збільшення періоду деформографічних спостережень розкриває можливість виділення періодичностей рухів кори, зокрема періодів так званих знакозмінних рухів, які важливі для визначення сейсмічної активізації регіону. Також важливо відзначити необхідність вивчення глобальних геологічних явищ, у період військового стану на території країни та використання краю для вирішення її економічних завдань. Актуальність проведення геодинамічних і сейсмологічних досліджень викликана, зокрема, підвищенням сейсмічності на планеті, в окремих регіонах та реєстрацією серії місцевих відчутних підземних поштовхів. Завдання дослідження полягає у виявленні зв'язків сучасних горизонтальних рухів кори із проявами місцевої сейсмічності, яка характерна міграцією епіцентрів землетрусів. Також важливо акцентувати, що питанню вивчення сейсмічності та рухів кори виміряних за допомогою стаціонарних деформографів у науковій літературі приділено незначну увагу, зокрема в зарубіжній. Отримані результати допоможуть у побудові моделі сеймотектонічних процесів у сеймогенеруючих регіонах, які характерні особливим географічним положенням.

Методи

Методика дослідження полягає в побудові залежностей зміщень земної кори від часу, розрахунок кінематичних параметрів георухів кори, а саме – швидкостей рухів, прискорень рухів, вікових ходів, проведено порівняння швидкостей та прискорень рухів кори в інтервалах аномальних сучасних горизонтальних рухів кори. Побудовано просторово-часовий розподіл місцевої сейсмічності за 2021 р. Побудовано та проаналізовано сеймотектонічні процеси за весь період спостереження – 1999–2021 рр. Використано кореляційний аналіз під час вивчення зв'язків кінематичних характеристик сучасних горизонтальних рухів кори та часового розподілу місцевої сейсмічності. Для вирішення поставлених завдань використано результати спостережень горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому за допомогою кварцового деформометра базою 24,5 м, змонтованого у штольні смт Королеве. Відомості про сейсмічний стан отримано за допомогою цифрових сейсмометрів, які функціонують на режимних геофізичних станціях Відділу сейсмічності Карпатського регіону та Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Однією з особливостей просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності в Закарпатському внутрішньому прогині є прояв невеликої кількості підземних поштовхів, що спостерігаються відчутним населенням землетрусів – вони можуть не відбуватися протягом декількох років. У (Малицький та ін., 2018) представлена можливість визначити механізм вогнища землетрусу за даними малої кількості станцій, що особливо актуально в регіонах з порівняно невисоким рівнем місцевої сейсмічної активності, а зіставлення механізму землетрусу з даними про геологічну будову регіону дало змогу з'ясувати ймовірні тектонічні передумови землетрусу. Активно проводяться дослідження рухів земної кори за допомогою GNSS-станцій (Савчук, Янків-Вітковська, & Джуман, 2018). Поряд із сейсмічними активними регіонами проведено електромагнітний моніторинг, оскільки згідно з теоретичними викладками певні явища мають глобальне походження, підтверджено, що такі глобальні зв'язки між сейсмічними і електромагнітними подіями з високою ймовірністю існують (Семенов, Ладанівський, & Петріщев, 2018). Деформаційні процеси в Закарпатському внутрішньому прогині складні: вони відрізняються як за напрямками, так і величинами сучасних горизонтальних рухів кори. Важливим є комплексний підхід, що дає змогу відтворити просторову картину динаміки змін гірничого масиву внаслідок природотехногенних факторів, а також фактор наявності режимних геодезичних спостережень для підтвердження небезпеки розвитку деформаційних процесів та остаточного визначення стадії деформації гірничого масиву (Кузьменко та ін., 2019). На основі обчислених із GPS-даних моделі компонент горизонтальних деформацій знайдено швидкості головних значень і швидкості головних осей деформацій земної кори, встановлено, що найбільші значення максимального зсуву в районах, розташованих навколо Українських Карпат, швидкості дилатації має схожий розподіл (Марченко та ін., 2019). На основі виконаних досліджень (Третяк, & Брусак, 2020) зроблено припущення, що кореляційний взаємозв'язок між горизонтальними деформаціями визначеними за даними ГНСС і узагальненою сейсмічністю проявляється тільки в зонах субдукції, де є інтенсивна сейсмоактивність і мають прояви постійні деформації земної кори, що підтверджується проявом зон кореляцій, які розташовані вздовж однієї зі сторін активних розломів. На підставі аналізу інформації про геодинамічну і сеймотектонічну ситуацію в районі майданчика розташування проєктованих споруд встановлено положення потенційних сейсмоактивних зон, в яких можуть виникати місцеві землетруси, та визначено сеймотектонічний потенціал найближчих до майданчика сегментів розломів у термінах максимальних магнітуд (Купльовський та ін., 2020). Проведені дослідження, завдяки яким можна більш предметно визначати повні характеристики вогнищ землетрусів, швидкості та напрямки поширення сейсмічних хвиль відповідно до будови фундаменту та осадової товщі, що, у свою чергу, дає змогу доповнювати дані тривалого моніторингу екобезпечних природних і техногенних подій у Закарпатському внутрішньому прогині (Козловський та ін., 2020). Результати описаних у (Корчін та ін., 2020) досліджень дають можливість уточнити геолого-структурні особливості будови земної кори Закарпаття, інтерпретувати просторовий розподіл геофізичних полів та розшифровувати особливості місцевої геодинаміки і сеймотектонічного процесу, уточнювати рівень і характер геоекологічних небезпек, ефективніше прогнозувати та досліджувати глибинно-просторовий розподіл

корисних копалин. Також у (Штогрин та ін., 2021) виявлено зв'язки між впливом розломних зон на зсувні процеси за їхнім відображенням у гравімагнітних полях, що можуть у майбутньому застосовуватись під час просторового прогнозування розвитку зсувів на територіях зі спорідненими структурно-тектонічними умовами. Обґрунтовано геологічну інформативність морфології анізотропних трансформаций потенціальних полів у дослідженні розломної тектоніки Українських Карпат та прилеглих прогинів застосування анізотропних трансформаций потенціальних полів сприятиме підвищенню достовірності та детальності простеження глибинних розломів (Анікеєв, & Розловська, 2021). Удосконалено систему інтерпретації отриманих результатів, за допомогою яких визначають локальні, регіональні та телесейсмічні події різної природи та енергетичного рівня для розв'язання певних практичних задач опрацювання та інтерпретації сейсмологічних даних і покращення оцінки активності тектонічних структур України (Андрущенко, & Ляшук, 2021). Для дослідження глибинної будови південного заходу Українських Карпат, де розташована Карпатська аномалія електропровідності, у 2015 та 2020 рр. проведено сучасні синхронні магнітотелуричні дослідження та отримано просторово-часову картину розподілу геомагнітних варіацій та електричного поля на поверхні Землі, за якою можна оцінити електропровідність та геоелектричну структуру регіону (Кушнір та ін., 2021). Деформації території Заходу України є складними і лише частково співвідносяться з відомою тектонічною будовою в регіоні, на схилах Українського щита помітна кореляція вертикальних зміщень та глибини залягання поверхні кристалічних порід, зони стиску виділяються на Закарпатті, що відповідає території Закарпатського глибинного розлому, а також на північному заході регіону, згідно з геодинамічною інтерпретацією аномальних зон деформацій (Третяк, & Брусак, 2022). Вивчення динаміки розвитку зсувів у межах зсувонебезпечних територій за даними супутникової інтерферометрії в поєднанні з даними літолого-стратиграфічних, геоморфологічних і структурно-тектонічних досліджень дає змогу отримати результати для прогнозування розвитку цих процесів і мінімізації їхнього негативного впливу на природно-техногенні системи (Углицьких, Вижва, & Іванік, 2020). У даний період обстановка тангенціального стиснення в Карпатах зберігається, про це свідчать поля стиснення по тектонофізичних і сейсмологічних даних, у верхній частині кори накладається розтягнення під дією гравітаційних сил (Муровська, Амашукелі, & Альохін, 2019). Представлено картину тектонічних процесів, яка побудована на основі геодезичних результатів та вказує на хорошу кореляцію з геофізичними аномаліями (магнітні, гравітаційні аномалії, вогнища землетрусів тощо) (Pospíšil, Švábenský, & Weigel, 2013). Під час вивчення горизонтального руху відмічено нерівномірну деформацію, а саме, зареєстровано максимальне зменшення швидкості та виявлено, що деформація поверхні Землі передуює землетрусу (Gojatanov, 2014). Комплексні геофізичні спостереження та дослідження сеймотектонічних процесів у Закарпатті та їх зв'язків із геофізичними полями показали вплив сучасних рухів кори на місцеву сейсмічність і кореляцію варіацій параметрів метеорологічного, гідрологічного та гідрогеологічного станів регіону

з періодами інтенсивних рухів верхніх шарів земної кори в зоні Оашського глибинного розлому (Ігнатишин та ін., 2018, 2019, 2022).

Результати

1. Режимні геофізичні спостереження в Закарпатському внутрішньому прогині. На території Закарпаття тривалий період проводяться наукові дослідження геодинаміки та сеймотектоніки регіону. Тут функціонує мережа режимних геофізичних станцій, сейсмічних станцій і пунктів деформометричних спостережень Карпатського відділення та Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (рис. 1).

Початок деформометричних спостережень у Закарпатті закладено у 1980-х рр., коли було змонтовано перший кварцовий деформограф у штольні на г. Мужіївській (Берегівський район, Закарпатська обл.). Тут у штольні було встановлено два горизонтальних кварцових деформометри базами 11,5 та 20 м ($48,23^\circ$, $22,65^\circ$). За результатами спостережень на деформометричній станції "Мужіїво" визначено головні осі деформацій: стиснення в близько широтному напрямку та розтяг у близько меридіональному. Паралельно із спостереженнями на станції "Мужіїво", проведено монтажні роботи зі встановлення комплексу деформометричних станцій на Режимній геофізичній станції "Берегове" на околиці м. Берегове. Два кварцових деформометри були змонтовані у штольні РГС "Берегове" взаємно перпендикулярно ($48,22^\circ$, $22,70^\circ$), бази деформометрів 6 та 24,5 м відповідно. Результати деформометричних спостережень на даній станції підтвердили характер рухів, визначених на деформометричній станції "Мужіїво". Важливим етапом у вивченні сучасних горизонтальних рухів у Закарпатському внутрішньому прогині, зокрема у східній його частині, є деформометричні спостереження на станції "Королеве" ($23,14^\circ$, $48,16^\circ$). У Вигорлат-Гутинському вулканічному пасмі, зокрема в зоні Оашського глибинного розлому, змонтовано кварцовий деформограф базою 24,5 м. На цій станції реєструється інтенсивне розширення порід у широтному напрямку величиною $+10 \times 10^{-7}$. Деформометричні спостереження на пункті деформометричних спостережень "Королеве" почалися в 1999 р., азимут деформометра становить 80° . Отримані результати дають характеристику геологічним процесам у регіоні – область молодого вулканізму, висока рухливість земної кори. Відмічено зв'язок сейсмічної активності в регіоні та сучасних горизонтальних рухів кори в Закарпатському внутрішньому прогині за досліджуваний період. На території Закарпаття періодично реєструються місцеві землетруси, серед яких відбуваються і відчутні підземні поштовхи. На основі аналізу сейсмологічних спостережень у регіоні вказано на активізацію місцевої сейсмічності: на фоні багатьох землетрусів малого енергетичного класу реєструються також відчутні підземні поштовхи (1–2 події на рік). Останні сейсмічні дослідження в Закарпатському внутрішньому прогині показали на наявність так званих періодів затишшя, що стосується відчутних місцевих землетрусів. Останній такий період тривав з липня 2015 р. по січень 2020 р., коли було зареєстровано відчутний місцевий землетрус інтенсивністю в 4 бали за шкалою MSK-64 в Берегівському районі Закарпатської області.

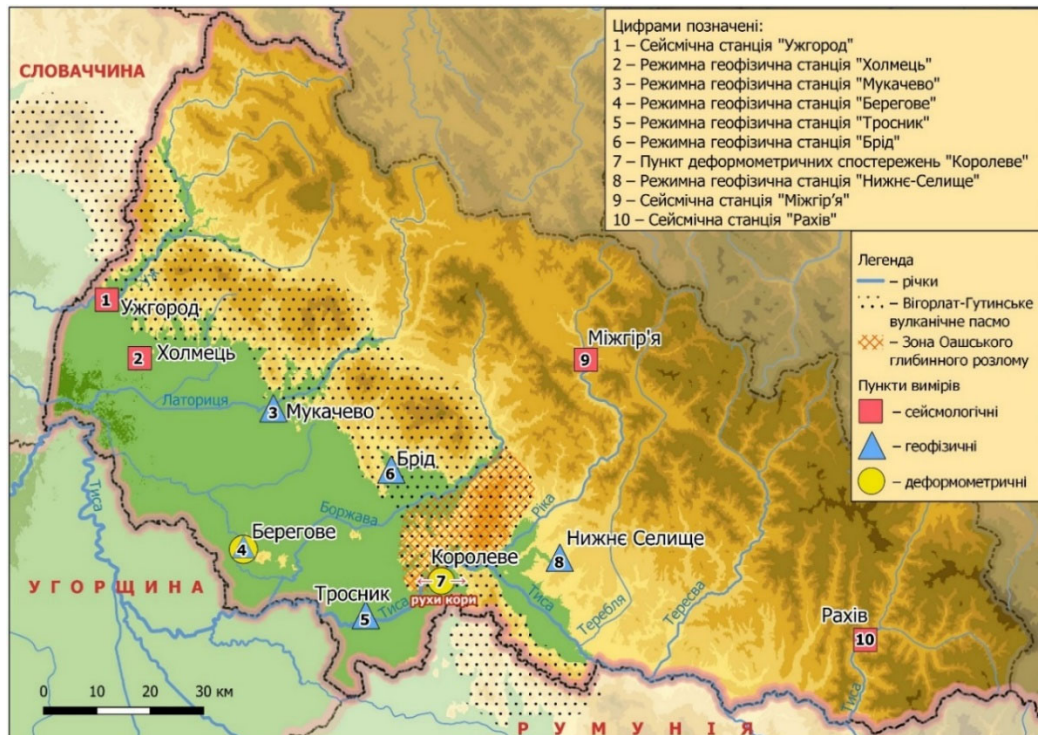


Рис. 1. Мережа комплексних режимних геофізичних, сейсмічних станцій та пунктів деформометричних спостережень Карпатського відділення та Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України на території Закарпатського внутрішнього прогину

Деформометр змонтований на пункті деформометричних спостережень "Королеве" базою 24,5 м характерний підсиленням 0,138 мкм на 1 мм запису на деформограммі. За результатами деформометричних спостережень у зоні Оашського глибинного розлому за 2021 р. розраховано зміщення кори, яке становить +31 мкм. Розрахунок деформацій земної кори за результатами спостережень сучасних горизонтальних рухів кори за 2021 р. дає результат: +1261 нстр, $(+12.61 \times 10^{-7})$. Варіації зміщень земної кори в зоні Оашського глибинного розлому за досліджуваний період лежать в інтервалі від 15 діб до 1 місяців, 3 місяців. Починаючи від травня 2021 р., встановлено, що відбувається розширення порід до грудня 2021 р., коли розширення змінилося на стиснення порід.

Проведено побудову просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності за 2021 р. За період з початку року

до серпня 2021 р. на території Закарпатського внутрішнього прогину сейсмічними станціями Відділу сейсмічності Карпатського регіону Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України зареєстровано 117 місцевих землетрусів, що підтверджує минулорічні спостереження щодо частоти прояву місцевої сейсмічності. Також необхідно відзначити, що в жовтні 2021 р. було зареєстровано відчутний місцевий землетрус у Берегівському районі. Реєстрація відчутних місцевих землетрусів вказує на періодичність сеймотектонічних процесів у регіоні. Відносно місячного розподілу місцевої сейсмічності вказано на інтенсивну сейсмічність у перші п'ять місяців року та в липні 2021 р.

Завдяки проведеному аналізу просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності та сучасних горизонтальних рухів кори за 2021 р. відзначено особливості сеймотектонічного процесу в Закарпатському внутрішньому прогині (рис. 2).

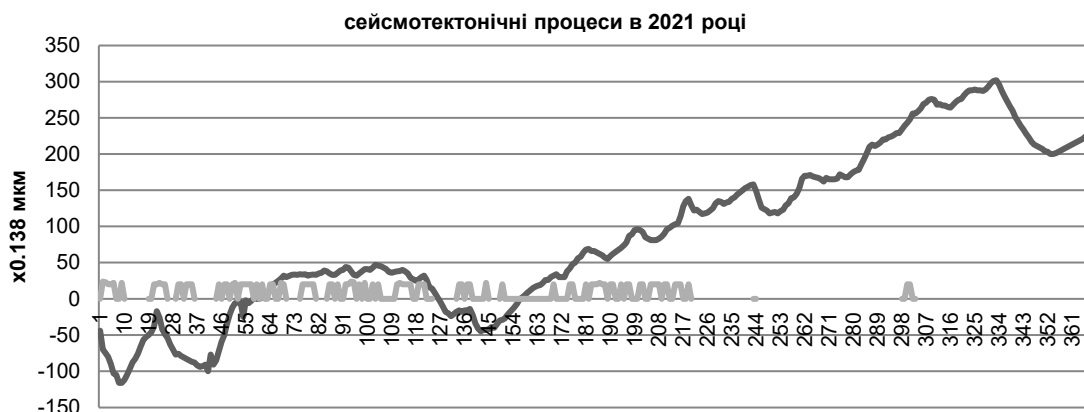


Рис. 2. Сейсмічний стан у Закарпатському внутрішньому прогині (діаграма сірого кольору), сучасні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива чорного кольору). 2021 рік

Вивчення зв'язків між параметрами сейсмічного стану та геодинамічного стану регіону за досліджуваний період показало, що землетруси реєструвалися в періоди, коли рухи кори характеризувалися зміною знаків зміщення гірських порід у зоні Оашського глибинного розлому. Більшість підземних поштовхів відбувалися під час локальних стиснень верхніх шарів земної кори.

2. Кінематика сучасних горизонтальних рухів у регіоні. Проведено аналіз варіацій швидкостей сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2021 р. та їх кінематичних параметрів. Розраховано швидкості геомеханічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині, зокрема визначено середньорічну величину швидкості зміщень верхніх шарів земної кори в зоні Оашського глибинного розлому за

2021 р., що становить 0,097 мкм/добу. Представлено часовий розподіл величин швидкостей сучасних горизонтальних рухів кори за 2021 р. у центральній частині Закарпатського внутрішнього прогину. Амплітуда коливання розрахованих величин швидкості сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому варіює в інтервалі від 0,07 мкм/добу до 2,5 мкм/добу. Періоди коливання кінематичних параметрів рухів кори становлять приблизно 20 діб в січні-лютому 2021 р. та у другій половині року. Можливо, це спричинено сезонними варіаціями геофізичних параметрів, припливними деформаціями. Виконано дослідження просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності за 2021 р. та їх зв'язок із кінематикою сучасних горизонтальних рухів кори в регіоні (рис. 3).



Рис. 3. Кінематика сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому (діаграма чорного кольору), сейсмічність регіону (діаграма сірого кольору) у 2021 році. Закарпатський внутрішній прогин

Періоди підвищеної сейсмічної активності Закарпатського внутрішнього прогину корелюють із періодами геодинамічного стану, коли швидкості сучасних горизонтальних рухів кори характерні підвищеними величинами відмінними від фону в декілька разів. Також сейсмічність регіону проявлялась в періоди, що характеризувалися як підвищеними величинами швидкостей руху кори, так і періодами коливання розрахованого параметра геомеханічних рухів, що виражається їх подібністю та ростом амплітуди швидкості зміщення верхніх шарів земної кори.

Отже, за результатами проведених досліджень просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності та варіацій розрахованих швидкостей зміщень сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому відзначено зв'язок варіацій параметрів геофізичних полів з кореляцією періодів аномальних величин сейсмотектонічних процесів. Зокрема місцевий землетрус 27 жовтня 2021 р. відбувся в період максимуму швидкостей сучасних горизонтальних рухів кори, що вказує на важливий зв'язок досліджуваного параметра геодинамічного стану регіону та можливість використання даного параметра під час вивчення стану підготовки та розрядки напружено-деформованого стану порід у сейсмонезбезпечному регіоні.

3. Динаміка сучасних горизонтальних рухів кори на Пункті деформометричних спостережень "Королеве" за 2021 рік та їх зв'язок із сейсмічними процесами в Закарпатському внутрішньому прогині. Проведено вивчення просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності Закарпатського внутрішнього прогину за 2021 р. та варіацій прискорення сучасних горизонтальних рухів кори виміряних на деформометричній станції "Королеве". Середня

величина прискорення сучасних горизонтальних рухів кори в 2021 р. в зоні Оашського глибинного розлому становить +0,018 мкм/добу. Початок року: січень-лютий характерний інтенсивними рухами кори та відповідно аномальними величинами прискорення рухів кори, що відрізняються від основних фонових значень у декілька разів. Максимальна амплітуда прискорення рухів кори становить 4,8 мкм/добу. Відчутний місцевий землетрус 27 жовтня 2021 р. відбувся в інтервалі часу, коли параметр динаміки регіону перебував у стані зростання, тобто в цей період земна кора перебуває в процесі розширення порід, що змінив стиснення порід. Дослідження періодичності у варіаціях параметра геодинаміки регіону вказало на діапазон зміни прискорення рухів кори від 2 до 30 діб, причому інтенсивні рухи кори початку року зменшують свої значення до першої половини року. Друга половина року характерна поступовим зростанням амплітуди коливання прискорення рухів кори та зменшенням періоду коливання величини прискорення, відчутний місцевий землетрус відбувся в періоди знакозмінного процесу в сучасних горизонтальних рухах кори зони Оашського глибинного розлому (рис. 4).

Аналіз просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності в 2021 р. та варіації прискорення сучасних горизонтальних рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому виявив той факт, що періоди підвищеної сейсмічності регіону та часові інтервали, де параметри динаміки георухів відмічені як збільшені протягом двох тижнів, корелюють між собою. Отже, параметри динаміки горизонтальних рухів кори є індикатором напруженого деформованого стану порід та можуть бути застосовані під час розв'язання екологічних проблем регіону геологічного характеру.



Рис. 4. Прискорення рухів кори в зоні Оашського глибинного розлому (крива сірого кольору), сейсмічність Закарпатського внутрішнього прогину (діаграма чорного кольору). 2021 рік

Представлено геомеханічні процеси в зоні Оашського глибинного процесу за весь період деформометричних спостережень у регіоні. Деформометричні дослідження в зоні Оашського глибинного розлому почалися в 1999 р. за допомогою горизонтального кварцового деформографа базою 24,5 м (азимут становить 80°). Характер рухів кори за досліджуваний період представлений розширеннями порід величиною $+466,164$ мкм ($4661,64 \times 10^{-7}$).

Період тривалістю з 1999 по 2001 р. відзначений як розширення порід величиною $+182$ мкм (7460 нстр). Період тривалістю 2,3 року характерний як інтервал зі

сталого швидкістю рухів (тобто за цей період величина зміщення порід не змінилася). За цим періодом інтенсивних рухів кори та сталим положенням точки спостереження відбуваються інтенсивне розширення протягом 7,4 років з величиною $+300$ мкм. Інтенсивне розширення порід переходить у період рухів кори, що характеризується коливаннями величиною 8,3 мкм та частотою 1–1,5 років.

Вивчено зв'язок місцевої сейсмічності з геодинамічним станом, побудовано просторово-часовий розподіл місцевої сейсмічності (рис. 5).

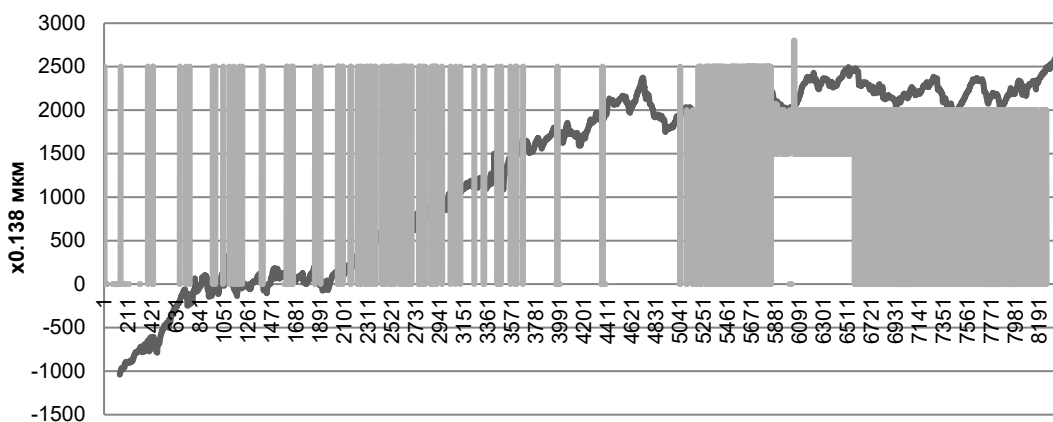


Рис. 5. Сучасні горизонтальні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому за період спостереження 1999–2021 рр. (крива чорного кольору); місцева сейсмічність (діаграма сірого кольору)

Аналіз просторово-часового розподілу місцевої сейсмічності та порівняння його із зміщеннями верхніх шарів земної кори показав особливості геодинамічного стану регіону. З початку спостережень у Закарпатському внутрішньому прогині сейсмічність регіону представлена землетрусами з періодами близько одного року, що стосується інтенсивного розширення та періоду геодинамічного затишшя. Також слід відмітити інтервал тривалістю 4,2 року, що супроводжується активізацією сейсмічності та переходить у подібний інтервал, характерний сейсмічним затишшям. У 2012 р. інтенсивне розширення порід переходить у фазу стиснення, завершення якої є початком періоду сейсмічної активізації регіону. Виділяють часовий інтервал 2021 р., коли сучасні горизонтальні рухи кори представлені інтенсивним розширенням порід, що може бути початком періоду інтенсивних знакозмінних

процесів, зокрема – розширення порід. Сейсмічна активізація регіону за останні 5 років характерна проявом численних підземних поштовхів (100–200 місцевих землетрусів). На початку 2020 р. в Берегівському районі відбувся місцевий відчутний землетрус, який проявився вперше після 19 липня 2015 р., коли було зареєстровано серію місцевих землетрусів, у тому числі і відчутних (Тячівський район, смт Буштино).

Дискусія і висновки

Проведені геофізичні спостереження в Закарпатському внутрішньому прогині, їх обробка та аналіз приводить до таких висновків: сучасні горизонтальні рухи в зоні Оашського глибинного розлому характерні періодичностями, що тривають певні інтервали часу, зокрема вікові ходи деформацій у регіоні змінюються протягом року. Величина деформацій в регіоні представлена

розширеннями порід величиною $+12,61 \times 10^{-7}$. Ця величина підтверджує успадкованість сучасних горизонтальних рухів кори в регіоні: вікові ходи лежать в інтервалі -15×10^{-7} та $+30 \times 10^{-7}$, що характерно для рухів верхніх шарів земної кори в Карпато-Балканському регіоні. Розраховано фізичні параметри георухів у регіоні: швидкості горизонтальних рухів кори та їх динаміку; прискорення зміщення точки спостереження в зоні Оашського глибинного розлому. Визначено середньорічну величину швидкості зміщень верхніх шарів земної кори в зоні Оашського глибинного розлому за 2021 р., що становить $0,097$ мкм/добу. Аналіз часового розподілу швидкостей сучасних горизонтальних рухів кори в досліджуваному регіоні показав факт кореляції часових інтервалів інтенсивних рухів кори, аномальних величин швидкостей рухів кори та місцевої сейсмічності. Проведено розрахунок прискорення рухів кори за 2021 р., побудовано просторово-часовий розподіл місцевої сейсмічності та варіацій величини прискорення рухів у зоні Оашського глибинного розлому: величина прискорення георухів становить $+0,018$ мкм/добу. Просторово-часовий розподіл місцевої сейсмічності та варіації прискорення сучасних горизонтальних рухів показав кореляцію інтенсивних рухів кори та їх динамічних змін із періодами реєстрації місцевих землетрусів, зокрема їх відчутної частини. Відчутний місцевий землетрус у жовтні 2021 р. на території Берегівського району (на межі сіл Тросник та Фанчико) зареєстрований при стисненні порід на фоні сезонного розширення порід, у періоди розрахованих підвищених величин швидкостей і прискорень сучасних горизонтальних рухів кори. Отримані результати деформометричних спостережень за означений період роблять внесок у загальну картину сучасних горизонтальних рухів кори в Закарпатському внутрішньому прогині, а саме підтверджують отримані в попередніх дослідженнях висновки: загальне розширення порід величиною $+10 \times 10^{-7}$. На регіональному рівні рухи кори в зоні Оашського глибинного розлому суттєво відрізняються від характеру рухів кори в зоні Берегівського горбогір'я. Така тенденція знакозмінних рухів кори в минулому супроводжувалася підвищенням сейсмічності регіону, зокрема реєстрацією сильних підземних поштовхів (Берегівський землетрус 1965 р.). Просторово-часовий розподіл місцевої сейсмічності та сучасних горизонтальних рухів кори за весь період деформометричних спостережень у зоні Оашського глибинного розлому показав наявність періодів коливання рухів кори тривалістю 12 років: 2–3 роки знакозмінні процеси (розширення та стиснення порід, загальна величина зміщення коливається в області нульових рухів). Найбільш актуальним та важливим є періоди, що йдуть за цими інтервалами затишшя, саме в цей час реєструються підземні поштовхи, причому їх частота зростає. Підвищення сейсмічності регіону відбувається на фоні загального розширення порід за сталих вікових рухів кори. На сучасному етапі сучасні рухи кори перебувають у стані розширення порід, якщо така тенденція не зміниться, слід очікувати підвищення сейсмічності в регіоні. Отримані результати дослідження та геологічна будова регіону актуалізує розширення географії деформометричних спостережень, зокрема в Тячівському та Мукачівському районах, що останнім часом відзначені як регіони сейсмічної активізації – тут реєструють потужні місцеві землетруси, що відчуває населення краю. Результати досліджень геодинамічного стану Закарпаття, як сейсмогенеруючого регіону, важливі в плані використання їх під час розв'язання екологічних проблем краю, зокрема його геологічного аспекту.

Внесок авторів: Василь Ігнатишин – концептуалізація, формальний аналіз, аналіз джерел, підготування огляду літератури; Дмитро Малицький – методологія; Тібор Іжак – написання (оригінальна чернетка); Стефан Молнар – програмне забезпечення; Моніка Ігнатишин – написання (перегляд і редагування), спостереження, систематизація бази даних; Адальберт Ігнатишин – валідація, організація спостережень.

Список використаних джерел

- Андрущенко, Ю., & Ляшук, О. (2021). Локальні сейсмологічні мережі атомних електростанцій України як складові частини національної системи сейсмологічного моніторингу. *Геодинаміка*, 2(31), 84–91.
- Анікеев, С., & Розловська, С. (2021). Анізотропні трансформації регіональних гравімагнітних полів південного сходу Українських Карпат. *Геодинаміка*, 2(31), 66–83.
- Ігнатишин, В. В., Іжак, Т. Й., Ігнатишин, А. В., & Ігнатишин, М. Б. (2018). Зв'язок електромагнітної емісії низькочастотного діапазону з геодинамічним та сейсмічним станами Закарпаття в 2017 році. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія "Географічні науки"*, 9, 115–122.
- Ігнатишин, В. В., Іжак, Т. Й., Ігнатишин, М. Б., & Ігнатишин, А. В. (2019). Метеорологічні аспекти геодинамічного стану Закарпатського внутрішнього прогину. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія "Географічні науки"*, 10, 137–145. <https://doi.org/10.32999/KSU2413-7391>
- Ігнатишин, В. В., Малицький, Д. В., Іжак, Т. Й., Ігнатишин, М. Б., & Ігнатишин, А. В. (2022). Гідрогеологічний аспект сейсмотектонічних процесів у Закарпатському внутрішньому прогині. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 98(3), 42–48. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.98.05>
- Козловський, Е. М., Максимчук, В. Ю., Малицький, Д. В., Тимошук, В. Р., Грицай, О. Д., & Піріжок, Н. Б. (2020). Взаємозв'язок структурно-тектонічних та сейсмічних характеристик Центральної частини Закарпатського прогину. *Геодинаміка*, 1(28), 62–70.
- Корчін, В. О., Русаков, О. М., Буртний, П. О., & Карнаухова, О. Е. (2020). Походження зон низької густини в кристалічній корі Закарпатського прогину (Україна) за даними петрофізичного термобаричного моделювання. *Геодинаміка*, 1(28), 81–93.
- Кузьменко, Е. Д., Максимчук, В. Ю., Багрий, С. М., Сапужак, О. Я., Чепурний, І. В., Дешиця, С. А., & Дзьоба, У. О. (2019). Комплексування методів електророзвідки у задачах прогнозування техногенних просідань і провалів на родовищах солі Передкарпаття. *Геодинаміка*, 2(27), 54–65.
- Купльовський, Б., Бубняк, І., Волошин, П., Павлюк, О., Крук, О., & Трєвого, І. (2020). Вплив локальних сейсмотектонічних та інженерно-геологічних умов на сейсмічну небезпеку територій (на прикладі майданчика забудови в м. Ужгород). *Геодинаміка*, 1(28), 29–37.
- Кушнір, А., Бурахович, Т., Ільєнко, В., & Ширков, Б. (2021). Сучасні магнітотелуричні дослідження Українських Карпат. *Геодинаміка*, 2(31), 92–101.
- Малицький, Д. В., Гніп, А. Р., Грицай, О. Д., Асташкіна, О. А., & Парфєнюк, А. Й. (2018). Визначення параметрів вогнища за хвильовими формами малих землетрусів у Карпатському регіоні України. *Геофізичний журнал*, 40(6), 136–149. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151041>
- Марченко, О. М., Перій, С. С., Ломпас, О. В., Голубінка, Ю. І., Марченко, Д. О., Крамаренко, С., & Abdulsawad Salawu (2019). Визначення тензора швидкостей горизонтальних деформацій в Західній Україні. *Геодинаміка*, 2(27), 5–15. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.005>
- Муровська, А. В., Амашукелі, Т. А., & Альохін, В. (2019). Поля напружень і деформаційні режими в межах української частини Східних Карпат за тектонофізичними даними. *Геофізичний журнал*, 41(2), 84–98. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i2.2019.164455>
- Савчук, С. Г., Янків-Вітковська, Л. М., & Джуман, Б. А. (2018). Вплив сейсмічних процесів, Сонця і Місяця на малі зміни координат GNSS-станцій. *Геодинаміка*, 2(25), 15–26.
- Семенов, В. Ю., Ладанівський, Б. Т., & Петріщев, М. С. (2018). Виявлення проявів землетрусів у варіаціях природного електромагнітного поля. *Геодинаміка*, 2(25), 65–70.
- Третяк, К. Р., Брусак, І. В. (2020). Дослідження взаємозв'язку сейсмічності та сучасних горизонтальних зміщень за даними перманентних ГНСС станцій у Карпато-Балканському регіоні. *Геодинаміка*, 1(28), 5–18.
- Третяк, К., & Брусак, І. (2022). Сучасні деформації земної кори території заходу України за даними ГНСС мережі "GEOTERRACE". *Геодинаміка*, 1(32), 16–25.
- Углицьких, Є., Вишва, С., & Іванік, О. (2020). Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні території Закарпаття за даними радарної інтерферометрії. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(91), 94–99.
- Штогрин, Л., Анікеев, С., Кузьменко, Е., & Багрий, С. (2021). Відображення активності зсувних процесів у регіональних гравітаційному та магнітному полях (на прикладі Закарпатської області). *Геодинаміка*, 1(30), 65–67.
- Gojmanov, M. (2014). The stability of the geodetic points in connection with geodynamic processes in Azerbaijan. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 11, 3(175), 279–288. <https://doi.org/10.13168/AGG.2014.0012>
- Pospišil, L., Švábenský, O., & Weigel, J. (2013). Movement tendencies in the Moravia region: kinematical model. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10, 3(171), 41–44.

References

- Andrushchenko, Yu., & Liashchuk, O. (2021). Local seismological networks of nuclear power plants of Ukraine as components of the national seismological monitoring system. *Geodynamika*, 2(31), 84–91 [in Ukrainian].
- Anikeiev, S., Rozlovska, S. (2021). Anisotropic transformations of regional gravi-magnetic fields of the Ukrainian Southeast Carpathian. *Geodynamika*, 2(31), 66–83 [in Ukrainian].
- Gojmanov, M. (2014). The stability of the geodetic points in connection with geodynamic processes in Azerbaijan. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 11, 3(175), 279–288. <https://doi.org/10.13168/AGG.2014.0012>
- Ihnatyshyn, V. V., Izhak, T. Y., Ihnatyshyn, A. V., & Ihnatyshyn, M. B. (2018). The Communication of electromagnetic emissions of low-frequency range with geodynamic and seismic states of Transcarpathia in 2017. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Geographical Sciences"*, 9, 115–122 [in Ukrainian].
- Ihnatyshyn, V. V., Izhak, T. Y., Ihnatyshyn, M. B., & Ihnatyshyn, A. V. (2019). Meteorological aspect of the geodynamic state of the Transcarpathy infrastructure. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series "Geographical Sciences"*, 10, 137–145 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32999/KSU2413-7391>
- Ihnatyshyn, V. V., Malyskyi, D. V., Izhak, T. Y., Ihnatyshyn, M. B., & Ihnatyshyn, A. V. (2022). Hydrogeological aspect of seismotectonic processes in the Transcarpathian internal depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 98(3), 42–48. [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.98.05>
- Kozlovskiy, E. M., Maksymchuk, V. Yu., Malyskyi, D. V., Tymoshchuk, V. R., Hrytsai, O. D., & Pyrizhok, N. B. (2020). Structural-tectonic and seismic characteristics relationships in the Central part of the Transcarpathian internal depression. *Geodynamika*, 1(28), 62–70 [in Ukrainian].
- Korchin, V. O., Rusakov, O. M., Burtnyi, P. O., & Karnaukhova, O. E. (2020). The origin of the low density zones in the crystalline crust of the Transcarpathian depression (Ukraine) from petrophysical thermobaric modelling. *Geodynamika*, 1(28), 81–93 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.01.081>
- Kuzmenko, E. D., Maksymchuk, V. Yu., Bahrii, S. M., Sapuzhak, O. Ya., Chepurnyi, I. V., Deshchytia, S. A., & Dzoba, U. O. (2019). Integration of electric prospecting methods for forecasting the subsidence and sinkholes within the salt deposits in the Precarpathian area. *Geodynamika*, 2(27), 54–65 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.054>
- Kuplovskiy, B. Ye., Bubniak, I. M., Voloshyn, P. K., Pavliuk, O., Kruk, O., & Trevo, I. (2020). Influence of local seismotectonic and engineering-geological conditions on seismic danger of territories (exemplified by a construction site in Uzhgorod city). *Geodynamika*, 1(28), 29–37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.01.029>
- Kushnir, A., Burakhovych, T., Ilienkov, V., & Shyrkov, B. (2021). Modern magnetotelluric researches of the Ukrainian Carpathians. *Geodynamika*, 2(31), 92–101 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.02.092>
- Malyskyi, D., Hryp, A., Hrytsai, O., Murovska, A., Kravets, S., Kozlovskiy, E., & Mykyta, A. (2018). Source mechanism and tectonic setting of 29.09.2017 earthquake near Stebnyk. *Geodynamika*, 1(24), 100–110 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.01.100>
- Marchenko, O. M., Perii, S. S., Lompas, O. V., Holubinka, Yu. I., Marchenko, D. O., Kramarenko, S., & Abdulwasiiu Salawu. (2019). Determination of the horizontal strain rates tensor in Western Ukraine. *Geodynamika*, 2(27), 5–15 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.005>
- Murovska, A. V., Amashukeli, T. A., & Alokhin, V. (2019). Stress fields and deformational regimes within the limits of the Ukrainian part of the East Carpathians according to tectonophysical data. *Geophysical Journal*, 41(2), 84–98 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i2.2019.164455>
- Pospíšil, L., Švábenský, O. and Weigel, J. (2013). Movement tendencies in the Moravia region: kinematical model. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 10, 3(171), 41–44.
- Savchuk, S. H., Yankiv-Vitkovska, L. M., & Dzhuman, B. A. (2018). The influences of seismic processes, the Sun and the Moon on the small changes of coordinates of GNSS-stations. *Geodynamika*, 2(25), 15–26 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.015>
- Semenov, V. Yu., Ladanivskiy, B. T., & Petrishchev, M. S. (2018). Emergence of earthquakes footprint in natural electromagnetic field variations. *Geodynamika*, 2(25), 65–70 [in Ukrainian].
- Shtohryn, L., Anikeiev, S., Kuzmenok, E., & Bahrii, S. (2021). Reflection of the activity of landslide processes in the regional gravitational and magnetic fields (on the example of the Transcarpathian region). *Geodynamika*, 1(30), 65–67 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2021.01.065>
- Tretiak, K. R., & Brusak, I. V. (2020). The research of interrelation between seismic activity and modern horizontal movements of the Carpathian-Balkan region based on the data from permanent GNSS stations. *Geodynamika*, 1(28), 5–18 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2020.01.005>
- Tretiak, K., & Brusak, I. (2022). Modern deformations of Earth crust of territory of Western Ukraine based on "GEOTERRACE" GNSS network data. *Geodynamika*, 1(32), 16–25 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2022.02.016>
- Uhlitskykh, Ye., Vyzhva, S., & Ivanik, O. (2020). Vertical displacement monitoring of Zakarpattia region territory based on radar interferometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(91), 94–99 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 19.10.23
Прорецензовано / Revised: 04.01.24
Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Vasyl IHNATYSHYN^{1,2}, PhD (Phys. & Math.), Senior Research, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0727-2132
e-mail: rgstrs1962@i.ua

Dmytro MALYTSKY³, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-9156-739x
e-mail: dmalytsky@gmail.com

Tibor IZHAK^{2,3}, PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0940-8947
e-mail: tiboras@kmf.uz.ua

Stefan MOLNAR^{2,3}, PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-2959-9136
e-mail: molnar.d.istvan@kmf.org.ua

Monika IHNATYSHYN¹, Leading Engineer
ORCID ID: 0009-0000-0154-282x
e-mail: sitkomonika@i.ua

Adalbert IHNATYSHYN¹, Engineer of II cat.
ORCID ID: 0009-0002-8597-2417
e-mail: Adalbert_Ihnatisin@i.ua

¹Institute of Geophysics by S.I. Subbotin name of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

²Ferenc Rakoczi II Transcarpathian Hungarian College of Higher Education, Berehove, Ukraine

³Carpathian Branch of S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

GEODYNAMIC STATE OF THE TRANSCARPATHIAN INNER TROUGH BASED ON THE RESULTS OF DEFORMATION MONITORING OBSERVATIONS IN THE REGION

Background. The relevance of the research is determined by the gradual increase in local seismicity in the region, which occupies a peculiar geographical location, through which oil, gas and product pipelines pass, and in which critical infrastructure facilities are located that may be affected by the underground natural disaster. It is important to have information on the movements of the upper layers of the Earth's crust, their kinematics and dynamics, which significantly affect the stress-strain state of rocks and the release of energy from geomechanic processes. It is also necessary to investigate the influence of the region's geodynamics on the discharge of the stress-strain state of rocks.

Methods. The research methodology is to construct time-dependent crustal displacements and compare velocities and accelerations of crustal movements in the intervals of anomalous modern lateral movements of the Earth's crust. The velocities and accelerations of crustal movements are calculated, the kinematics of movements and seismicity of the region are compared. Correlation analysis of the observed series is applied. To solve the tasks, we used the results of observations of horizontal crustal movements in the Oaș deep-seated fault area using a quartz

strain gauge with a base of 24.5 m mounted in the adit of the Korolevo urban-type settlement. The seismic data were obtained using digital seismometers operating at the monitoring geophysical station of the Seismicity Department of the Carpathian region of S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Results. The article discusses the geodynamics of the Transcarpathian Inner Trough based on observations of modern lateral movements of the Earth's crust in the Oașh deep-seated fault area, which in 2021 were represented by rock extensions of $+12.61 \times 10^{-7}$. The physical parameters of geomotion in the region were calculated, the spatiotemporal distribution of local seismicity was established, and the relationship between seismic and geodynamic states in Transcarpathia in 2021 was studied. The variations of displacements of the upper layers of the Earth's crust over the entire period of deformation monitoring observations in Korolevo urban-type settlement (1999–2021) and the temporal distribution of local underground shocks were studied.

Conclusions. The analysis of the spatio-temporal distribution of local seismicity and modern lateral movements of the Earth's crust over the entire period of deformation monitoring observations in the Oașh deep-seated fault area has indicated an increase in the seismicity of the region in the intervals of intense crustal movements and the presence of periods of crustal movement fluctuations for 12 years: familiar variable processes (expansion and contraction of rocks, the total magnitude of displacement fluctuations in the region of zero movements) were detected for 2–3 years. The most relevant and important are the periods of 9–10 years following these calm intervals, since during this time earthquakes are recorded and their frequency is also found to be increasing. The intensification of seismicity in the region is observed against the background of general rock extension, which occurs due to the steady age-related crustal movements. At the present stage, the current crustal movements are in a state of rock expansion, and if this trend does not change, an increase in seismicity in the region should be expected.

Keywords: deformation gauge, modern lateral movements of the Earth's crust, crustal velocity, acceleration of rock motion, geodynamic state, earthquakes, local seismicity, seismotectonic processes, Oașh deep-seated fault.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 550.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.03>

Олена КРАСНІКОВА, асп.
ORCID ID: 0000-0002-4265-1982
e-mail: koatinga@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Павло КУЗЬМЕНКО, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0007-0157-9391
e-mail: pavlo.kuzmenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Сергій ВИЖВА, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ІНДЕКСУ КРИХКОСТІ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. О.В. Шабатурою)

Розглянуто поняття індексу крихкості породи, що широко застосовується для проєктування гідравлічного розриву пласта. Охарактеризовано три основні підходи до його розрахунку: мінералогічний, з використанням пружних властивостей, з використанням даних каротажу. Для кожного з підходів надано характеристику найбільш еживаних методів розрахунку, що були створені для порід з різним мінералогічним складом, із застосуванням різних фізичних властивостей або ж на основі різних емпіричних залежностей. Для двох вибірок ядерного матеріалу теригенних порід Дніпровсько-Донецької западини визначено мінералогічний індекс крихкості за основними петрогенними компонентами двома різними способами та індекс крихкості за пружними властивостями – модулем Юнга та коефіцієнтом Пуассона, кутом внутрішнього тертя. Було проведено порівняльну характеристику результатів, отриманих різними методами, що показала схожість тенденцій щодо літології та петрофізичних властивостей гірських порід. Автори рекомендують для використання при оцінці теригенних колекторів Дніпровсько-Донецької западини мінералогічну методику Жарві, що характеризується високою точністю при простоті застосування.

Ключові слова: ГРП, індекс крихкості, геомеханіка.

Вступ

Постановка проблеми. Методи інтенсифікації видобутку нафти і газу, зокрема гідророзрив пласта (ГРП), стають все більш вагомими у контексті досягнення енергонезалежності. Принципово важливим параметром для успішного ГРП є здатність порід цільового горизонту до утворення тріщин. Одним із ключових параметрів у оцінці даної характеристики є індекс крихкості (ІК). На сьогодні існує значна кількість різноманітних способів обчислення цього параметра на основі різних властивостей гірських порід, тож вибір оптимального методу його розрахунку для конкретної формації чи території є комплексним питанням, який залежить від конкретних геологічних умов, фізико-механічного стану досліджуваного пласта, його складу і повноти вивчення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стаття продовжує цикл публікацій кафедри геофізики ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, присвячених застосуванню геофізичних методів при проведенні ГРП та вивченні ущільнених теригенних порід-колекторів, (Краснікова, & Вижва, 2023; Вижва та ін., 2014, 2021; Олійник та ін., 2020; Безродна, & Вижва, 2019).

Поняття крихкості почали розглядати в літературі, пов'язаній з інженерією та механікою, з 60-х років минулого сторіччя (Hetenyi, 1966, Coates, & Parsons, 1966). Протягом останніх 60 років саме визначення крихкості як такої варіювалося. Її описували як відсутність пластичності, як поведінку, яка створює незначну деформацію під час руйнування породи, як появу руйнування на рівні або трохи вище межі текучості, як здатність матеріалу до руйнування без очевидної постійної деформації під час випробувань на розтяг або стиск, як легкість поширення тріщин тощо (Li, Han, & Zhu, 2023). Зауважимо, що у зв'язку з гетерогенністю та анізотропністю гірських порід,

термінологія, яку початково розробляли для таких матеріалів, як метали та кераміка, має застосовуватися в геофізиці з обережністю (Meng, Wong, & Zhou, 2021).

Зазвичай руйнування крихкої породи пов'язане з раптовим падінням напруги, навіть з можливістю розколу уламків породи. Для різних областей геоінженерії у роботі з гірськими породами це руйнування потрібно ефективно контролювати, щоб або сприяти, або стримувати його поширення. Отже, надійне розуміння крихкості може дати важливу інформацію для більш успішного планування проєктів у різних дисциплінах наук про Землю (Wang et al., 2023).

При роботі з нетрадиційними колекторами вуглеводнів та, зокрема, проєктуванні ГРП, індексу крихкості почали надавати увагу з початку ХХІ ст. Першими публікаціями, з присвячених цьому питанню, часто вважають статтю Rickman (2008), що започаткувала один із класичних підходів до обчислення ІК на основі пружних параметрів порід, та статтю Jarvie (2007), що започаткувала мінералогічний підхід.

Окрім використання при плануванні ГРП, індекс крихкості застосовується і в інших областях промислової та інженерної геофізики. Оцінювання крихкості є важливим і при проєктуванні горизонтального буріння (Lei, 2023). Розуміння фізико-механічних властивостей, включаючи крихкість, гранітів та інших магматичних порід в умовах високої температури та високих навантажень, відіграє суттєву роль у підтримці стабільності свердловини та мінімізації витрат на буріння при експлуатації циркулюючих геотермальних систем (Liu et al., 2023; Yin et al., 2022; Xiao et al., 2021). Індекс крихкості застосовується і при видобутку метану з вугільних пластів (Moska, 2021; Wu et al., 2023), а також видобутку корисних копалин у наземних та підземних виробках (Jeong, Choi, & Lee, 2023). В інженерній геофізиці оцінка крихкості важлива

© Краснікова Олена, Кузьменко Павло, Вижва Сергій, 2024

для моніторингу підземних та гідротехнічних споруд (Song et al., 2023; Herza, & Singh, 2022).

Різноманіття областей, що використовують індекс крихкості, привело до створення надзвичайно великої кількості методик його розрахунку. Так, у статті (Meng, Wong, & Zhou, 2021) наводиться більш ніж 80 різних способів отримання ІК. Тому нині через неузгодження у визначенні крихкості та різні сфери застосування не існує міжнародно визнаного стандарту для визначення індексу крихкості порід (Li, Han, & Zhu, 2023).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Індекс крихкості широко застосовує світова спільнота (Iyare, Blake, & Ramscook 2021; Vaisblat et al., 2022; Ba et al., 2021; Rybacki, Meier, & Dresen 2016), зокрема при проектуванні гідророзриву пласта та для інших задач геомеханіки (Moska, 2021; Altindag, 2002), проте в Україні він поки не набув поширення. Існує потреба в аналізі його застосування з урахуванням особливостей, характерних для порід-колекторів ДДЗ, що є переважно пісковиками з пониженими значеннями пористості, які часто характеризуються наявністю кварцового цементу та незначною кількістю з'єднаних між собою пор.

Формулювання цілей статті. Автори ставлять за мету розгляд та оцінку існуючих підходів до розрахунку індексу крихкості та вибір оптимального значення індексу для теригенних порід-колекторів Дніпровсько-Донецької западини.

Результати

Історія впровадження поняття індексу крихкості. У 1966 р. Коутс і Парсонс ввели поняття індексу крихкості породи (Coates, & Parsons, 1966), який визначався як відношення пружної деформації до загальної деформації при руйнуванні. На рис. 1 показано загальну криву напруги та деформації для тривісного стиснення, проведеного до руйнування. Синя лінія показує зміну деформації від прикладеного напруження у лінійній пружній області. Дотична до кривої в цій області відповідає модулю Юнга. Розрив зразка гірської породи відбувається при τ_{max} , що вказує на міцність породи. Межа текучості

зразка ідентифікується як перетин дотичної кривої в лінійній області з дотичною до τ_{max} , перенесеної на фактичні дані про напруження та деформації. Пружна деформація представлена областю ліворуч ε_{el} від межі текучості, а пластична деформація представлена областю праворуч $\varepsilon_{tot} = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$ від межі текучості, яка обмежена руйнуванням зразка. Нарешті, залишкова міцність породи, τ_{res} , відображається після досягнення пікової напруги. Таким чином, індекс крихкості ІК породи можна задати формулою

$$IK = \frac{\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{tot}}, IK = \frac{\tau_{max} - \tau_{res}}{\tau_{max}} \quad (1)$$



Рис. 1. Крива напруги та деформації (модифіковано за Miskimins, 2019)

Класифікація способів визначення індексу крихкості. Існує три принципово різних підходи до визначення індексу крихкості гірських порід залежно від використаних для обчислень даних: з використанням даних лабораторних вимірювань пружних параметрів, з використанням даних каротажу та мінералогічний. У межах кожного з цих трьох напрямків за останні десятиліття було розроблено ряд методів та підходів (рис. 2), основні з яких ми розглянемо нижче.



Рис. 2. Класифікація підходів до визначення індексу крихкості (модифіковано за Mews et al., 2019)

Мінералогічний підхід отримання ІК. Класичний мінералогічний підхід до визначення ІК запропоновано (Jarvie et al., 2007). Після дослідження сланців Барнетт, що характеризуються низькими значеннями пористості та проникності, було запропоновано рівняння для оцінки крихкості породи IK_{mnr1} з використанням масових часток її складових:

$$IK_{mnr1} = \frac{Q}{Q + CARB + CLY}, \quad (2)$$

де Q – вміст кварцу, $CARB$ – вміст карбонатів, CLY – вміст глини.

Кварц вважають крихким мінералом, тоді як карбонат і глину – менш крихкими і некрихкими відповідно. Це рівняння дає точні результати для формацій, які містять велику кількість кварцу і глини та малий вміст карбонатів. Однак для пластів зі значною кількістю карбонату це рівняння занижує значення індексу крихкості (Mews, Alhubail, & Barati, 2019).

Wang і Gale (2009) запропонували метод визначення IK_{mnr2} на основі мінерального складу гірських порід, який враховує вміст доломіту як внесок у крихкість та доломіт і ТОС як складові мінералів у знаменнику:

$$IK_{mnr2} = \frac{Q+DOL}{Q+DOL+CARB+CLY+TOC} \quad (3)$$

де Q – кварц, $CARB$ – карбонат, CLY – глина, DOL – доломіт, TOC – total organic carbon.

Також помічено (Jin et al., 2014), що силікатні мінерали, такі як польовий шпат і слюда, є більш крихкими, ніж глина в сланцевих колекторах (формула слюди $X_2Y_4-6Z_8O_{20}(OH,F)_4$; якщо іон X є кальцієм, вона вважається "крихкою" слюдою). Крім доломіту, інші карбонатні мінерали, такі як кальцит у вапняку, також більш крихкі, ніж глина. Отже, пропонується нове вираження крихкості IK_{mnr3} , яке включає силікатні мінерали (кварц, польовий шпат і слюду) і крихкі карбонатні мінерали (кальцит і доломіт):

$$IK_{mnr3} = \frac{QFM+CALC+DOL}{total} \quad (4)$$

де QFM – кварц+польові шпати+слюда, $CALC$ – кальцит, DOL – доломіт, $total$ – сума.

Підхід отримання ІК на основі пружних властивостей. Існують два загальних методи використання пружних властивостей для встановлення крихкісних властивостей. Це метод крихкості – brittleness method (Rickman et al., 2008) та метод ламкості – fracability method (Goodway, Varsek, & Abaco, 2006). Тріщиностійкість (fracture toughness) та її роль при проведенні гідророзриву протягом багатьох років викликала численні дискусії (Miskimins, 2019).

Обидва ці методи використовують зв'язок між пружними модулями гірської породи та її здатністю до утворення тріщин. Вважається, що більш крихка порода матиме вищий модуль Юнга E та нижчий коефіцієнт Пуассона, що полегшує ініціювання та поширення тріщин як природних, так і індукованих. На цьому твердженні ґрунтується підхід Рікмана. Підхід Гудвея базується не лише на модулі Юнга та коефіцієнті Пуассона, а й на використанні констант Ламе λ і μ . В однорідних і ізотропних матеріалах λ є константою нестисливості і характеризує опір породи розширенню руйнування. Константа жорсткості μ , описує стійкість породи до деформації зсуву.

Параметр тріщиностійкості дає змогу оцінити міцність зразка гірської породи при утворенні тріщини за умови, що в ньому уже присутня тріщина. Оскільки в геологічному середовищі поширені тріщини природного походження, цей параметр є важливим для оцінки взаємодії природних та спричинених ГРП тріщин.

Низьке значення ІК вказує на те, що матеріали зазнають крихкого руйнування, тоді як високі значення є сигналом пластичності. Отже, фації з низьким коефіцієнтом Пуассона, низькою тріщиностійкістю та ІК й високим модулем Юнга зазвичай є найкращими кандидатами для гідралічного розриву.

Наведемо формулу Рікмана:

$$IK_{ela1} = \frac{1}{2} * \left(\frac{E-E_{min}}{E_{max}-E_{min}} + \frac{v-v_{min}}{v_{max}-v_{min}} \right) \quad (5)$$

де E – модуль Юнга, v – коефіцієнт Пуассона.

Одним із найпростіших способів вираження індексу крихкості IK_{ela2} у лабораторних умовах є

$$IK_{ela2} = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (6)$$

де σ_c і σ_t – міцність на одноосове стиснення і міцність на розтяг за бразильським тестом відповідно (Meng et al., 2021).

Бразильський тест – це непрямий метод випробування для визначення міцності на розрив крихких матеріалів, таких як бетон, гірська порода тощо. У цьому тесті тонкий круглий диск діаметрально стискається до руйнування. Стиснення викликають розтягальні напруження по нормалі до вертикального діаметра, які є по суті постійними в області навколо центру. Непряма міцність

на розтяг зазвичай розраховується на основі припущення, що руйнування відбувається в точці максимальної напружки на розтяг, тобто в центрі диска (Li, & Wong, 2012).

Інший спосіб теж пов'язаний зі співвідношенням цих показників IK_{ela3} :

$$IK_{ela3} = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} \quad (7)$$

Оскільки σ_c і σ_t є двома основними механічними параметрами, які можна легко отримати під час звичайних лабораторних випробувань, вищезгадані методики набули широкого використання. Однак вони мають кілька недоліків. По-перше, фізичне значення для двох індексів не відображає процес руйнування породи. По-друге, цей метод більше підходить для опису міцності гірської породи, ніж її крихкості. Крім того, порода з різними значеннями σ_c і σ_t може мати однаковий коефіцієнт, а діапазон його варіації є вузьким.

У розрахунках IK_{ela4} використовується і кут внутрішнього тертя ϕ , що визначається як кут кривої Мора при нульовому напруженні. Вважається, що більш крихкі породи характеризуються вищим значенням кута:

$$IK_{ela4} = \sin \phi \quad (8)$$

Підхід отримання ІК на основі каротажних даних. Способи розрахунку ІК за допомогою каротажних даних були запропоновані для характеристики нетрадиційних покладів сланцевого газу та пошуку пластів-кандидатів на гідророзрив (Meng, Wong, & Zhou, 2021).

Пара коефіцієнтів, розрахованих за допомогою швидкостей P - і S -хвиль навколо свердловини, відповідно, виражаються як

$$IK_{Vp} = \int_{r=R}^{+\infty} \frac{\Delta V_p(r)}{V_p dr} \quad (9)$$

$$IK_{Vs} = \int_{r=R}^{+\infty} \frac{\Delta V_s(r)}{V_s dr} \quad (10)$$

де R – радіус свердловини; V_p і V_s – швидкості P - і S -хвиль відповідно; ΔV_p і ΔV_s – варіації швидкостей P - і S -хвиль відповідно, і отримані за допомогою томографії часу проходження P -хвилі та інверсії S -хвилі диполя.

Вважається, що породи з високою крихкістю мають тенденцію генерувати велику кількість мікротріщин на стінці свердловини під час буріння свердловини, що призведе до великої зміни швидкості радіальної пружної хвилі.

У літературі широко представлені емпіричні рівняння для окремих формацій та регіонів, що дають змогу визначити ІК за каротажними даними. Наприклад, для сланців Барнетт виведено залежності (Mews, Alhubail, & Barati, 2019):

$$IK_{log1} = -1,4956 \times NPHI + 0,9763, \quad (11)$$

$$IK_{log2} = -0,01104 \times DTC + 1,4941, \quad (12)$$

де $NPHI$ – нейтронна пористість, DTC – час проходження акустичної хвилі.

Визначення індексів крихкості для порід Дніпровсько-Донецької западини. Розрахунки ІК здійснювалися для двох вибірок зразків гірських порід.

Перша вибірка представлена зразками теригенних порід (рис. 3) родовища північної частини Дніпровсько-Донецької западини, відібраних із глибин до 4500 м. Породи представлені пісковиками та аргілітами із вмістом карбонатів до 17,5 % та пористістю до 10 %.

Аналіз мінералогічного складу було проведено для 20 зразків з вибірки. Мінералогічні ІК (Jarvie ІК та Jin ІК відповідно) розраховано за методиками Jarvie та Jin (формули 2 та 4). Результат для обох методів має високу збіжність (рис. 4). За рахунок невисокого вмісту карбонатів у зразках метод Jarvie має задовільну точність,

незважаючи на його відносну простоту. На рис. 5 маємо змогу оцінити, що тренди залежностей для обох методів зберігаються, незважаючи на різницю в абсолютних значеннях ІК. Варто зазначити, що різниця у значеннях ІК більша 0,1 спостерігається для зразків із підвищеним вмістом карбонатів.

Розрахунок пружних і механічних параметрів у лабораторних умовах проводився для 15 зразків, кут внутрішнього тертя було розраховано для 3 зразків. ІК розраховувався за методами Rickman та з використанням кута внутрішнього тертя (формули 5 і 8). Отримані результати мають

достатньо стійкий зв'язок з пружними параметрами порід (рис. 6). Коефіцієнт кореляції між індексом крихкості та швидкостями повздовжніх хвиль близький до 0,8, що вказує на відносно стійку залежність між цими параметрами. Значення коефіцієнта детермінації $\sim 0,64$ дає змогу вважати прийнятною якість взаємозв'язку.

Результати розрахунків для методик мають високу збіжність (рис. 7). Коефіцієнт детермінації $> 0,9$ зазвичай свідчить про стійкість взаємозв'язку між параметрами, проте через невеликий розмір вибірки не можна зробити однозначних висновків.

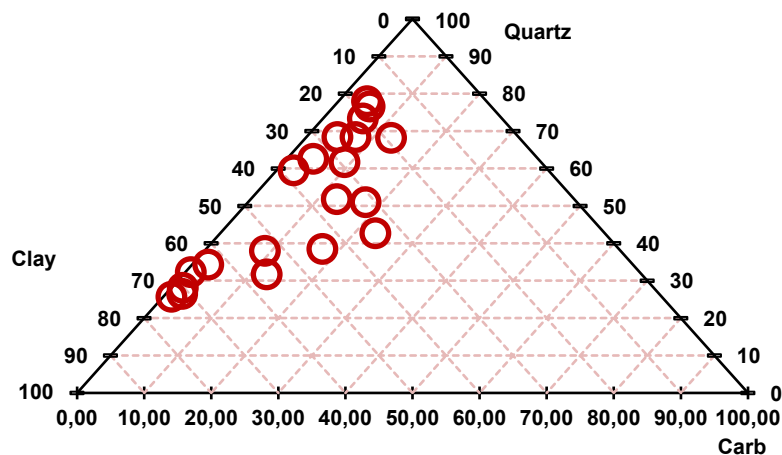


Рис. 3. Діаграма мінерального складу вибірки 1

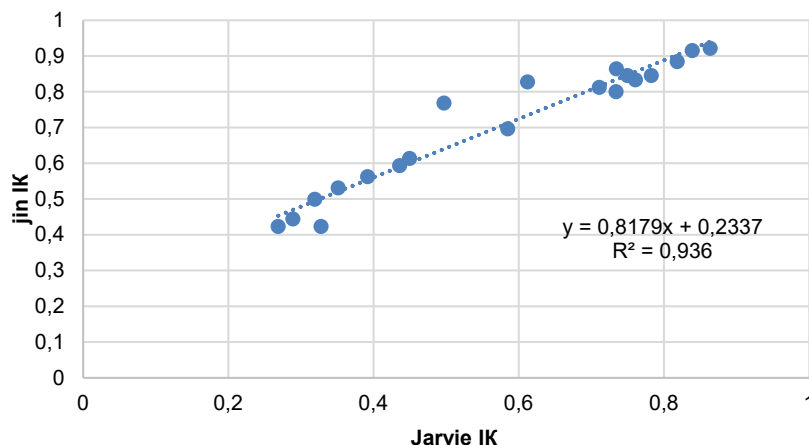


Рис. 4. Результат розрахунків мінералогічного ІК за різними методиками

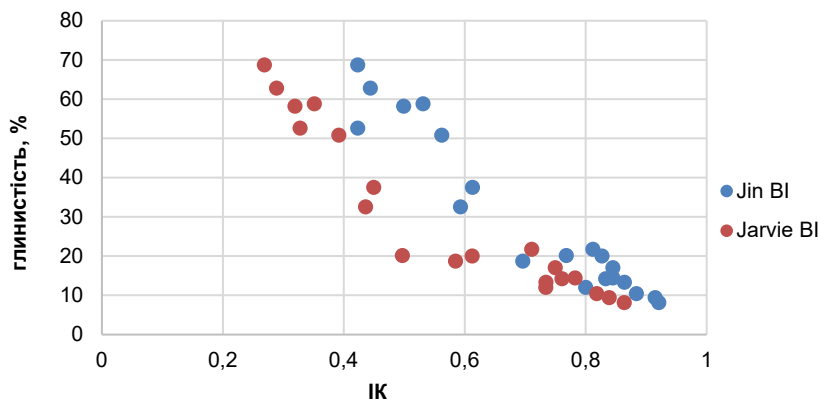


Рис. 5. Залежності мінералогічних ІК від глинистості

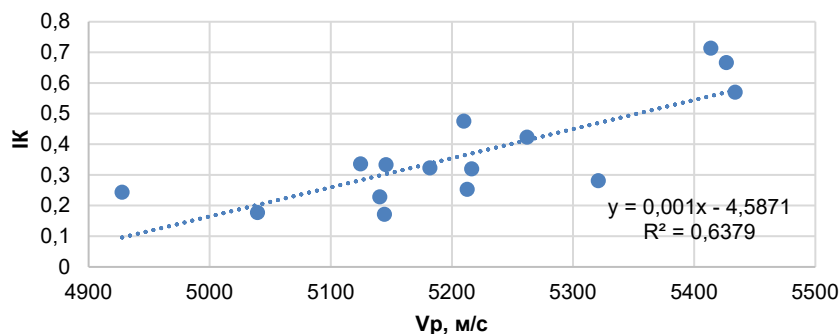


Рис. 6. Залежність між ІК та швидкостями повздовжніх хвиль

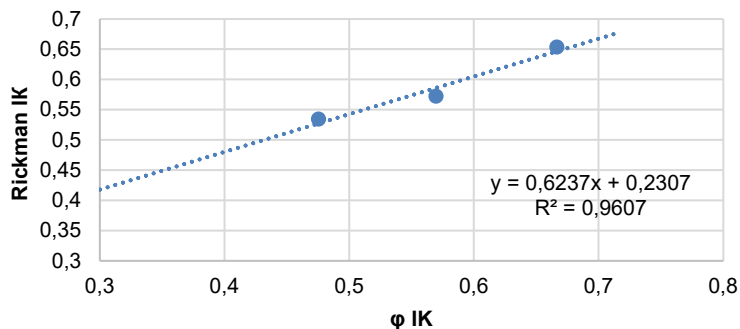


Рис. 7. Порівняння ІК за методикою Рікмана та кутом внутрішнього тертя

Друга вибірка представлена зразками теригенних порід (рис. 8) родовища, розташованого в південно-східній частині Дніпровсько-Донецької западини, відібраних із глибин до 3500 м. Породи представлені здебільшого грубо- та середньозернистими пісковиками та аргілітами, характеризуються невеликим вмістом карбонатів (менше 15 %), пористість коливається від 7 до 16 %.

Аналіз мінералогічного складу було проведено для 79 зразків з вибірки, мінералогічний ІК розраховано за методикою Jarvie (рис. 9).

Розрахунок пружних і механічних параметрів у лабораторних умовах проводився для 23 зразків, ІК було

розраховано за методом Rickman (рис. 10). Порівнюючи мінералогічний та еластичний ІК, варто звернути увагу на те, що пористість, що має істотний вплив на пружні параметри, не враховується у розрахунках за методом Jarvie. Тому за наявності спільного тренду у параметрах все ж спостерігаються розбіжності.

Порівнюючи результати для двох вибірок, можемо побачити спільний тренд для залежності від глинистості в обох вибірках (рис. 11), адже для теригенних порід саме параметр глинистості пов'язаний із пластичністю, що, у свою чергу, відповідатиме меншій здатності до крихкої деформації і, відповідно, утворенню тріщин.

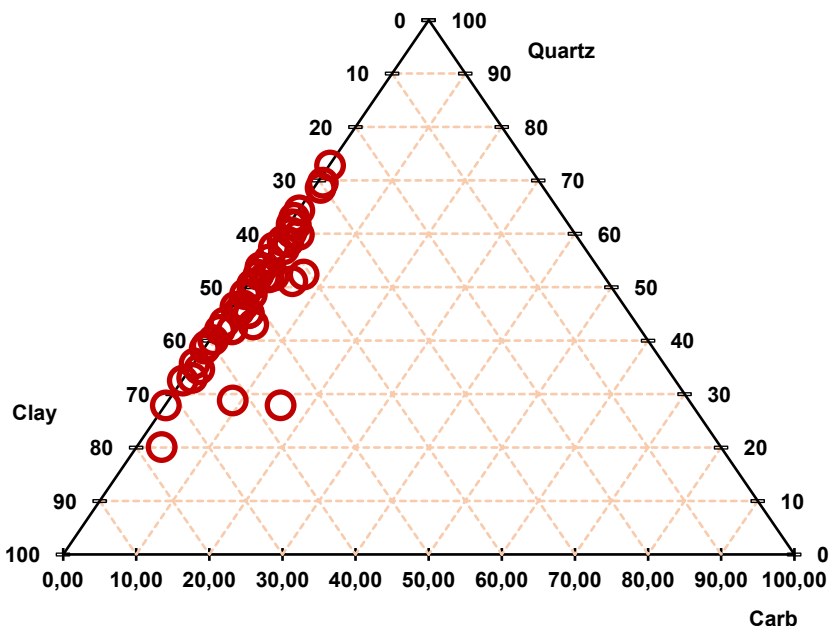


Рис. 8. Діаграма мінерального складу вибірки 2

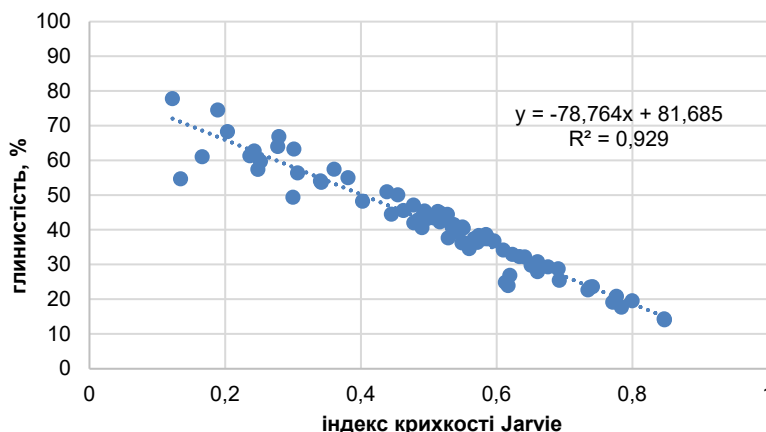


Рис. 9. Залежність мінералогічного ІК від глинистісті

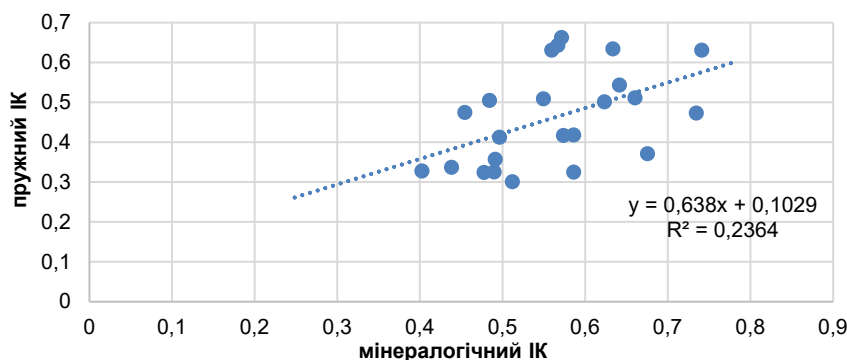


Рис. 10. Залежність між мінералогічним та пружним ІК

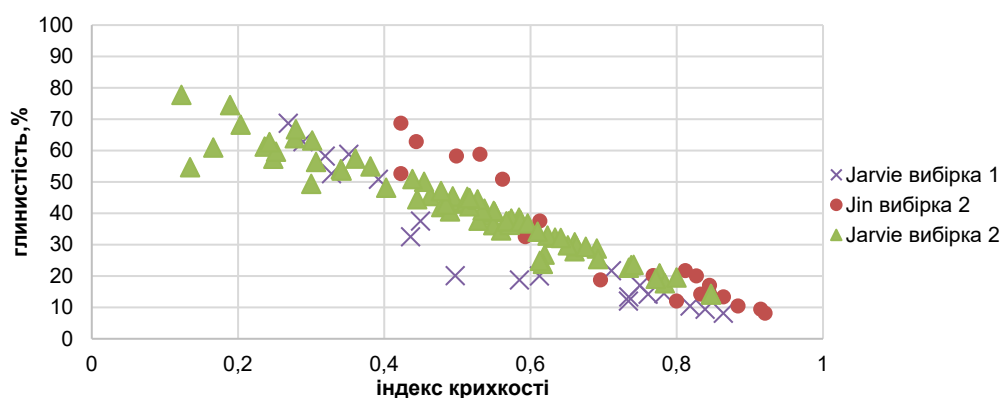


Рис. 11. Залежності мінералогічних ІК для двох вибірок від глинистісті

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, зазначимо, що найстійкіший результат отримано за методикою Jarvie. Низькі коефіцієнти пористості та карбонатності досліджуваних теригенних порід ДДЗ відповідають оптимальним характеристикам для його застосування. Також серед мінералогічних ІК його розрахунок є відносно простим, адже за вхідні дані потребує лише результати геохімічного аналізу основних петрогенних елементів і не включає, наприклад, ТОС. Це дає змогу оперувати більшою вибіркою зразків при аналізі їхніх властивостей.

Для теригенних порід, досліджених авторами, найважливішим є параметр глинистісті, який відповідає за здатність порід до пружної деформації і має обернену залежність від коефіцієнта крихкості.

Відзначимо, що на крихкість чинять вплив не лише властивості самої породи, але й умови, в яких перебуває порода (тиск і температура, диференціальні напруження тощо) (Rybacki, 2016). Дослідження потребують і

текстурно-структурні особливості порід, адже в реальному геологічному середовищі у ІК може проявлятися анізотропність. Тому цікавими виявилися результати порівняння залежностей ІК для двох вибірок, адже відхилення від тренду можуть бути пов'язані з фізико-механічним станом самого пласта.

Варто зазначити, що поняття "індекс крихкості" є узагальнюювальним терміном, що поєднує в собі методи оцінки здатності матеріалів до утворення тріщин, що розроблені спеціалістами з різних дисциплін для різних задач. Тому не варто підходити до зіставлення результатів, отриманих за різними методами, кількісно, важливою є якісна порівняльна оцінка трендів властивостей.

Дискусія і висновки

Проведено аналіз існуючих методів розрахунку індексу крихкості, серед яких особливу увагу було приділено мінералогічному та пружному підходу, розглянуто переваги та обмеження методів. Для теригенних порід з

північної та південно-східної частин Дніпровсько-Донецької западини проведено розрахунок та порівняльний аналіз індексів крихкості різними методами: Jarvie, Jin, Rickman, кута внутрішнього тертя. Автори рекомендують метод Jarvie як найбільш відповідний та одночасно простий у використанні. Зазначимо, що робота з індексами крихкості потребує попереднього аналізу літології та петрофізичних параметрів порід, оскільки більшість методів розрахунку розробляється для конкретної формації чи регіону і може показувати недостовірні результати для порід з відмінними межами фізичних характеристик. Також варто пам'ятати, що утворення тріщини при ГРП – це процес, що залежить не лише від складу та властивостей порід, тож індекси крихкості можна використовувати лише в комплексі з іншими геомеханічними параметрами та враховуючи умови, в яких перебуває цільовий горизонт.

Внесок авторів: Олена Краснікова – концептуалізація, формальний аналіз, методологія, написання (оригінальна чернетка); Павло Кузьменко – формальний аналіз; Сергій Вижва – валідація даних, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

- Безродна, І., & Вижва, С. (2019). Аналіз акустичних властивостей порід-колекторів Рунівщинської площі на основі петрофізичних досліджень в різних баричних умовах. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(86), 21–26. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.03>
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І., & Онищук, Д.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофізичний журнал*, 36, 1, 145–157. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163>
- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Орлюк, М.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., & Шабатура, О.В. (2021). Електричні та пружні параметри ущільнених порід східної частини північної приборової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(95), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>
- Краснікова О., & Вижва С. (2023). Формування швидкісної моделі і теоретичні основи методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події при проведенні гідророзриву пласта. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 101(2), 38–42. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.101.05>
- Олійник, О., Антонюк, В., Безродна, І., & Вижва, С. (2020). Аналіз особливостей покладів газу ущільнених порід-колекторів та літолого-петрофізична оцінка відкладів верхнього та середнього карбону Святогірської площі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(89), 89–95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.12>
- Altindag, R. (2002). The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102, 61–66.
- Ba, J., Hu, P., Tan, W., Müller, T., & Fu, L. (2021). Brittle mineral prediction based on rock-physics modelling for tight oil reservoir rocks. *Journal of Geophysics and Engineering*, 18, 970–983. <https://doi.org/10.1093/jge/gxab062>
- Coates, D., & Parsons, R. (1966). Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 3(3), 181–189. <https://doi.org/10.4095/300105>
- Goodway, B.V., Varsek, J., & Abaco, C. (2006). Practical Application of P-Wave AVO for Unconventional Gas Resource Plays: Seismic Petrophysics and Isotropic AVO. *The Recorder*, 31, 90–95.
- Herza, J., & Singh, R. (2022). Considerations for brittleness in tailings. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 32, 7–11. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.32.0007>
- Hetenyi, M. (1966). Handbook of experimental stress analysis. USA: Wiley.
- Iyare, U., Blake, O., & Ramsook, R. (2021). Fracability evaluation of the upper Cretaceous Naparima Hill Formation, Trinidad. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109599. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109599>
- Jarvie, D., Hill, R., Ruble, T., & Pollastro, R. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin – AAPG BULL.*, 91, 475–499. <https://doi.org/10.1306/121906060608>
- Jeong, H., Choi, S., & Lee, Y.-K. (2023). Evaluation of Cutting Performance of a TBM Disc Cutter and Cerchar Abrasivity Index Based on the Brittleness and Properties of Rock. *Applied Sciences*, 13(4):2612. <https://doi.org/10.3390/app13042612>
- Jin, X., Shah, S., Roegiers, J.-C., Zhang, B. (2014). Fracability Evaluation in Shale Reservoirs -An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. *SPE Journal*, 20. <https://doi.org/10.2118/168589-MS>
- Lei, W., Liu, X., Ding, Y., Xiong, J., & Liang, L. (2023). The investigation on shale mechanical characteristics and brittleness evaluation. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49934-0>
- Li, D., Han, M., Zhu, Q. (2023). Evaluation of Rock Brittleness Index under Dynamic Load. *Appl. Sci.*, 13, 4698. <https://doi.org/10.3390/app13084698>
- Li, D., & Wong, L.N.Y. (2013). The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46, 269–287. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0257-7>
- Liu, Z., Wang, C., Zhang, M. et al. (2023). Cracking property and brittleness evaluation of granite under high-temperature true triaxial compression in geothermal systems. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 99. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00631-2>
- Meng, F., Wong, L.N., & Zhou, H. (2021). Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 13, 221–247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>
- Mews, K.S., Alhubail, M.M., & Barati, R.G. (2019). A Review of Brittleness Index Correlations for Unconventional Tight and Ultra-Tight Reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070319>
- Miskimins, J. (2019). Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements Society of Petroleum Engineers.
- Moska, R. (2021). Brittleness index of coal from the Upper Silesian Coal Basin. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 91–101. <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0007>
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E. et al. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008*. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- Rybacki, E., Meier, T., & Dresen, G. (2016). What controls the mechanical properties of shale rocks? Part II: Brittleness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 144, 39–58.
- Song, Zx., Zhang, Jw., Zhao, Sk. et al. (2023). Brittleness of layer sandstone under triaxial loading and unloading. *J. Cent. South Univ.*, 30, 2234–2251. <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5372-y>
- Vaisblat, N., Harris, N.B., Ayranci, K., Chalaturnyk, R., & Power, M. (2022). Rock Compositional Control on Geomechanical Properties of the Montney Formation, Western Canadian Basin. *SSRN Electronic Journal*.
- Wang, F.P., & Gale, J.F. (2009). Screening criteria for shale-gas systems. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 59, 779–793.
- Wang, J., Du, J., Li, W. et al. (2023). Brittleness index evaluation of gas-bearing sandstone under triaxial compression conditions. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 160. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00713>
- Wu, D., Li, B., Wu, J., Hu, G., Gao, X., & Lu, J. (2023). Influence of Mineral Composition on Rock Mechanics Properties and Brittleness Evaluation of Surrounding Rocks in Soft Coal Seams. *ACS Omega. Dec.*, 29(9(1):1375–1388. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07731>. PMID: 38222615; PMCID: PMC10785081
- Xiao, W., Zhang, D., Yang, H., Yu, B., & Li, S. (2021). Evaluation and analysis of sandstone brittleness under the influence of temperature. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8. <https://doi.org/10.1007/s40948-021-00324-8>
- Yin, T., Ma, J., Wu, Y. et al. (2022). Effect of high temperature on the brittleness index of granite: an experimental investigation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 81, 476. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02953-z>

References

- Altindag, R. (2002). The evaluation of rock brittleness concept on rotary blast hold drills. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 102, 61–66.
- Ba, J., Hu, P., Tan, W., Müller, T., & Fu, L. (2021). Brittle mineral prediction based on rock-physics modelling for tight oil reservoir rocks. *Journal of Geophysics and Engineering*, 18, 970–983. <https://doi.org/10.1093/jge/gxab062>
- Bezrodna, I., & Vyzhva, S. (2019) Analysis of the acoustic properties of the reservoir rocks of the Runovshchynska area on the basis of petrophysical studies in different baric conditions *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(86), 2–26. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.86.03> [in Ukrainian].
- Coates, D., & Parsons, R. (1966). Experimental Criteria for Classification of Rock Substances. *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 3(3), 181–189. <https://doi.org/10.4095/300105>
- Goodway, B.V., Varsek, J., & Abaco, C. (2006). Practical Application of P-Wave AVO for Unconventional Gas Resource Plays: Seismic Petrophysics and Isotropic AVO. *The Recorder*, 31, 90–95.
- Herza, J., & Singh, R. (2022). Considerations for brittleness in tailings. *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 32, 7–11. <https://doi.org/10.14311/APP.2022.32.0007>
- Hetenyi, M. (1966). Handbook of experimental stress analysis. USA: Wiley.
- Iyare, U., Blake, O., & Ramsook, R. (2021). Fracability evaluation of the upper Cretaceous Naparima Hill Formation, Trinidad. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109599. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109599>
- Jarvie, D., Hill, R., Ruble, T., & Pollastro, R. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin – AAPG BULL.*, 91, 475–99. <https://doi.org/10.1306/121906060608>
- Jeong, H., Choi, S., Lee, Y.-K. (2023). Evaluation of Cutting Performance of a TBM Disc Cutter and Cerchar Abrasivity Index Based on the Brittleness and Properties of Rock. *Applied Sciences*, 13(4):2612. <https://doi.org/10.3390/app13042612>

- Jin, X., Shah, S., Roegiers, and J.-C., & Zhang, B. (2014). Fracability Evaluation in Shale Reservoirs - An Integrated Petrophysics and Geomechanics Approach. *SPE Journal*, 20. <https://doi.org/10.2118/168589-MS>
- Krasnikova, O., & Vyzhva, S. (2023). Velocity model creation and theoretical basics of the methods of determining the hypocenter of a microseismic event while performing hydraulic fracturing. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 101(2), 38–2. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.101.05> [in Ukrainian].
- Lei, W., Liu, X., Ding, Y., Xiong, J., & Liang, L. (2023). The investigation on shale mechanical characteristics and brittleness evaluation. *Scientific Reports*, 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49934-0>.
- Li, D., Han, M., & Zhu, Q. (2023). Evaluation of Rock Brittleness Index under Dynamic Load. *Appl. Sci.*, 13, 4698. <https://doi.org/10.3390/app13084698>
- Li, D., & Wong, L.N.Y. (2013). The Brazilian Disc Test for Rock Mechanics Applications: Review and New Insights. *Rock Mech. Rock Eng.*, 46, 269–287. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0257-7>
- Liu, Z., Wang, C., Zhang, M. et al. (2023). Cracking property and brittleness evaluation of granite under high-temperature true triaxial compression in geothermal systems. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 99. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00631-2>
- Meng, F., Wong, L.N., & Zhou, H. (2021). Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review. *Journal of rock mechanics and geotechnical engineering*, 13, 221–247. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.06.008>
- Mews, K.S., Alhubail, M.M., & Barati, R.G. (2019). A Review of Brittleness Index Correlations for Unconventional Tight and Ultra-Tight Reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070319>
- Miskimins, J. (2019). Hydraulic fracturing: fundamentals and advancements Society of Petroleum Engineers.
- Moska, R. (2021). Brittleness index of coal from the Upper Silesian Coal Basin. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 91–101. <https://doi.org/10.13168/AGG.2021.0007>
- Oliinyk, O., Antoniuk, V., & Bezrodna, I. (2020). Analysis of tight gas reservoirs and lithological-petrophysical assessment of upper and middle Carboniferous strata of Svyatogorska area. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(89), 89–95. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.12> [in Ukrainian].
- Rickman, R., Mullen, M.J., Petre, J.E. et al. (2008). A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA, September 2008*. <https://doi.org/10.2118/115258-MS>
- Rybacki, E., Meier, T., & Dresen, G. (2016). What controls the mechanical properties of shale rocks? Part II: Brittleness. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 144, 39–58.
- Song, Zx., Zhang, Jw., Zhao, Sk. et al. (2023). Brittleness of layer sandstone under triaxial loading and unloading. *J. Cent. South Univ.*, 30, 2234–2251 <https://doi.org/10.1007/s11771-023-5372-y>
- Vaisblat, N., Harris, N.B., Ayranci, K., Chalaturnyk, R., & Power, M. (2022). Rock Compositional Control on Geomechanical Properties of the Montney Formation, Western Canadian Basin. *SSRN Electronic Journal*.
- Vyzhva, S., Mykhaylov, V., & Onyshchuk, I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geofizichnyi zhurnal*, 36, 145–157. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163> [in Ukrainian].
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Orlyuk, M., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2021). Electric and elastic parameters of carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the dnipro-donets depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(95), 25–33 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03>
- Wang, F.P., & Gale, J.F. (2009) Screening criteria for shale-gas systems. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 59, 779–793.
- Wang, J., Du, J., Li, W. et al. (2023) Brittleness index evaluation of gas-bearing sandstone under triaxial compression conditions. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*, 9, 160. <https://doi.org/10.1007/s40948-023-00713>
- Wu, D., Li, B., Wu, J., Hu, G., Gao, X., & Lu, J. (2023). Influence of Mineral Composition on Rock Mechanics Properties and Brittleness Evaluation of Surrounding Rocks in Soft Coal Seams. *ACS Omega. Dec.*, 29(1):1375–1388. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c07731>. PMID: 38222615; PMCID: PMC10785081
- Xiao, W., Zhang, D., Yang, H., Yu, B., & Li, S. (2021). Evaluation and analysis of sandstone brittleness under the influence of temperature. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 8. <https://doi.org/10.1007/s40948-021-00324-8>
- Yin, T., Ma, J., Wu, Y. et al. (2022). Effect of high temperature on the brittleness index of granite: an experimental investigation. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 81, 476. <https://doi.org/10.1007/s10064-022-02953-z>

Отримано редакцією журналу / Received: 08.11.23

Прорецензовано / Revised: 26.12.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Olena KRASNIKOVA, PhD Student
ORCID ID: 0000-0002-4265-1982
e-mail: koatinga@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Pavlo KUZMENKO, PhD (Geol.), Accos. Prof.
ORCID ID: 0009-0007-0157-9391
e-mail: pavlo.kuzmenko@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Serhii VYZHVA, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: vsa@univ.net.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF THE METHODS OF DETERMINING THE BRITTLENESS INDEX AND THEIR APPLICATION FOR TERRIGENOUS RESERVOIR ROCKS OF THE DNIPRO-DONETSK BASIN

The article discusses the concept of the rock brittleness index, which is widely used for the design of hydraulic fracturing. Three main approaches to its calculation (mineralogical, using elastic properties, using log data) are characterized. For each of the approaches, the characteristics of the most used calculation methods, which were created for rocks with different mineralogical composition, using different physical properties or based on different empirical dependencies, are given. For two sets of core material samples of terrigenous rocks of the Dnipro-Donetsk Basin, the mineralogical index of fragility according to the main petrogenic components was determined by two different methods and the brittleness index according to elastic properties – Young's modulus and Poisson's ratio, the angle of internal friction. A comparative characteristic of the results obtained by different methods was carried out, which showed the similarity of trends in lithology and petrophysical properties of rocks. The authors recommend the Jarvie mineralogical method, which is characterized by high accuracy and ease of use, for use in evaluating terrigenous reservoirs of the Dnipro-Donetsk Basin.

Key words: hydraulic fracturing, brittleness index, geomechanics.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.04>

Олександр МЕНЬШОВ, д-р геол. наук, ст. дослідник

ORCID ID: 0000-0001-7280-8453

e-mail: menshov@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВПЛИВ МІГРАЦІЇ ФЛЮЇДІВ НА МАГНІТНУ МІНЕРАЛОГІЮ ҐРУНТІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)

Вступ. Війна в Україні актуалізувала необхідність інтенсифікації видобутку вуглеводнів на власній території для підтримання та розбудови енергетичної незалежності держави. Ефективність, низьковартісність та актуальність залучення демонструють магнітні методи дослідження верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтового покриву з метою пошуків нафти і газу.

Методи. Методологія магнітних досліджень з метою пошуків вуглеводнів основана на методах дослідження магнетизму природних об'єктів та ґрунтового дію покриву, детальної магнітометрії природних систем та фізико-хімічних моделях зміни магнітної мінералогії під міграції вуглеводневого флюїду.

Результати. У дослідженні магнітної мінералогії ґрунтів важливим є розбракування джерел формування цих мінералів. Здебільшого ґрунтовий покрив містить мінерали природного ґрунтоутворного походження, аутогенні вторинні магнітні мінерали, а також інколи детритові ультрадисперсні магнітні фази. Для України найпоширенішими магнітними мінералами ґрунтів ґрунтоутворного походження є магнетит, магеміт, гематит та гетит. У той же час досвід проведення магніто-мінералогічних аналізів ґрунтів територій родовищ нафти і газу вказує на наявність сульфідів залізу. У першу чергу ідентифікується моноклінний піротин. Також у ґрунтах містяться й супутні гексагональний піротин, пірит, грейгіт. Наведено результати термомагнітних аналізів та петель гістерезису зразків ґрунтів з територій покладів вуглеводнів та проаналізовано їх мінеральний склад.

Висновки. Результати вивчення впливу міграції вуглеводневого флюїду на зміну мінерального складу ґрунтів вказує на значущу інформативність і перспективність впровадження методу у комплекс геологорозвідувальних робіт на різних етапах. Аутогенні зміни магнітних мінералів у верхній частині геологічного розрізу та ґрунтовому покриві, а також природне та антропогенне накопичення вуглеводневих продуктів у ґрунтах спричинює зміну магнітних властивостей та формує аномалії магнітного поля.

Ключові слова: ґрунтовий покрив, магнітні мінерали, магнітна сприйнятливість, флюїди, вуглеводні.

Вступ

Серед низки нових викликів, які поставила перед Україною війна, одним із ключових для підтримання та розбудови енергетичної незалежності є видобуток вуглеводнів на власній території. Актуальність запропонованих у рамках даної статті вишукувань можна розділити на загальну та безпосередньо наукову складові. Загальна актуальність та доцільність полягає в наявності низки управлінських рішень, які спонукають науковців до розробки нових ефективних алгоритмів і методів пошуків та розвідки родовищ нафти і газу. Зокрема, мова йде про загальнодержавну програму (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#n14>), ряд рішень РНБО України (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0009525-15#n2>, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/874/2019#Text>), діяльність Ради експертів з енергетичної безпеки при РНБО України, у тому числі розробку заходів щодо "...пошуку відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива". Наведені державні програми актуалізують відповідність запропонованого дослідження у сфері національної безпеки України. Крім того, очевидно є важливість з науково-дослідницького боку. Низка закордонних публікацій, робіт дослідників в Україні, а також наші власні результати вже на даному етапі доводять важливість залучення магнітних методів дослідження верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтового покриву з метою пошуків вуглеводнів. Отримано польові та лабораторні результати магнітометрії та вимірювання магнітних властивостей ґрунтів та нижчезалеглих геологічних шарів (Menshov et al., 2015). Розпочато побудову фізичних, геохімічних та математичних моделей впливу міграції вуглеводнів на зміну магнітної мінералогії, а також врахування ґрунтових (або ландшафтних аномалій), які пов'язані із природним магнетизмом ґрунтів та закономірностями геоморфологічної будови територій перспективних на поклади нафти і газу (Меньшов, 2018). Окреслені дослідження у свою чергу розділяються на

низку більш прецизійних і тонких завдань. Одним із них є потреба з'ясування та побудови магнітної моделі перетворень магнітних мінералів у ґрунтах та підстильних горизонтах за умови впливу міграції флюїду.

Отже, метою даної статті є продемонструвати сучасне бачення, алгоритм та інтерпретацію механізмів формування аутогенних (діагенетичних) мінералів у ґрунтовому покриві та підстильних горизонтах під впливом вуглеводнів.

Стан проблеми досліджень. Гравітаційні та магнітні дослідження дають змогу виявити аномалії, які пов'язані з особливостями фізичного розвитку гірських порід та ґрунтів (густина, магнітна сприйнятливість (MS, MC, X), намагніченість (IRM)), а комплексна інтерпретація допомагає зрозуміти форму та протяжність басейну, структурні неоднорідності, розташування розломів, глибину залягання фундаменту, наявність магматичних тіл (Craig, & Quagliaroli, 2020). У роботі (Gadirov et al., 2022) вивчалися особливості гравітаційного та магнітного полів, було порівняно отримані теоретичні результати з даними спостережень, проведено моделювання на родовищі Мурадханли Середньокуринської западини. Автори отримали від'ємні аномалії магнітного поля інтенсивністю у 20–30 нТл разом із пониженими значеннями магнітної сприйнятливості формувальних порід у зоні покладу. Зауважимо, що аномалії як магнітного поля, так і магнітних властивостей можуть бути різнознаковими і мати ознаки сильної пілоподібної дисперсії значень по профілю. Такі випадки відомі за одночасного розгляду результатів для Азербайджану та України в кооперації із зазначеними авторами (Gadirov et al., 2018).

У вивченні родовищ нафти і газу важливим є комплексування магнітних і геохімічних методів. Наприклад, у роботі (Sechman et al., 2020) проведено оцінку зв'язку між розподілом прямих і непрямих поверхневих геохімічних показників для території Зовнішніх Карпат Польщі. Дослідження включало аналіз молекулярного складу

зразків ґрунтового газу та вмісту кальциту, а також вимірювання магнітної сприйнятливості та pH зразків ґрунту. Дослідження містило 96 проб ґрунтового газу, відібраних із глибини 1,2 м, і 96 проб ґрунту, взятих із глибини 0,7–0,8 м. Максимальні концентрації метану, сумарних алканів C2–C5 та сумарних алканів C2–C4 становили: 2100, 10,43 та 0,772 ppm. Значення магнітної сприйнятливості змінювалися від 3,6 до $21,5 \times 10^{-8}$ м³/кг. Вторинні зміни мінерального складу ґрунтів підтверджують, що комплексна інтерпретація результатів, отриманих прямими та непрямими методами, є ще позитивним прикладом, який допомагає краще зрозуміти складний механізм міграції вуглеводнів. Зауважимо, що наведені результати підтверджують проведені нами дослідження Українських Карпат (Menshov et al., 2016).

Розглядаючи більш глибокі геологічні формації та вплив на їх магнітну мінералогію при міграції флюїдів, спостерігається (Badejo et al., 2021) підвищення магнітних параметрів на контактах газ-нафта та нафта-вода, що також незалежно ідентифікується за допомогою немагнітних методів. Зокрема, підвищення значень намагніченості викликано формуванням нового нанометричного оксиду заліза (магнетиту) і сульфіду заліза (грейгітової фази). Зауважимо, що близькі магнітні моделі було отримано і нами для України, що більш детально описано нижче.

Найвища інформативність магнітних методів досягається при комплексуванні з іншими геофізичними та геоінформаційними методами. Робота (De la Rosa et al., 2021) об'єднує спектральний аналіз супутникових зображень із магнітними та геохімічними даними гірських порід (магнітна сприйнятливість, ізотермічна залишкова намагніченість насичення, спектродіаметрія поглинання та рентгенівський дифракційний аналіз). Територією вишукувань є нафтоперспективний регіон на північному заході Венесуели (басейн Фалькон). Двоетапний кластерний аналіз виділив три кластери, пов'язані з різними рівнями змін у ґрунтах та підстильних породах (0,3–1 м). Крім того, вивчення магнетизму гірських порід та електронно-парамагнітного резонансу (EPR) зразків керну з нафтової свердловини у формації Vaca Muerta (пд. захід Аргентини) сприяв встановленню зв'язку між мікромагнітними аномаліями та глибинними резервуарами (Costanzo-Álvarez et al., 2019). Зокрема, термічна деградація керогену, що індукує формування дещо біодеградованої сирої нафти, впливає на первинні оксиди та сульфід заліза через дві діагенетичні стадії. На першому етапі відбувається часткове розчинення мінералів, а на другому діагенетичному етапі – заміна фрамбоїдального піриту аутогенним піритином, що виявлено за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM), аналізу термомагнітних кривих і залишкової намагніченості.

Формування магнітних аномалій та аутогенних мінералів під впливом міграції флюїдів можна розглядати і на більш глобальному рівні (Орлюк, & Пашкевич, 2012). У роботі (Lukin, 2014) відзначається, що останніми роками різко зросли оцінки вуглеводневого потенціалу земних надр, що пов'язано з відкриттям нафтових і газових гігантів на глибинах 4,5–10,5 км. Концентруючись у даному контексті на магнітометричних дослідженнях, слід враховувати результати (Пашкевич та ін., 2014; Орлюк, & Друкаренко, 2018), де наводяться дослідження магнітної сприйнятливості і щільності порід осадового чохла і кристалічного фундаменту з 8 свердловин, пробурених у північно-західній частині Дніпровсько-Донецького авлакогену, у межах Чернігівського сегменту, з метою встановлення зв'язку з його структурно-речовинними комплексами, а також з можливими шляхами проходження і скупчення

вуглеводнів. Крім того, щодо магнітної мінералогії відзначається, що підвищення магнітної сприйнятливості порід у процесі нагріву може бути пояснено переходами піритинової фази, а також, присутністю магемітової фази та її переходом у гематит (Друкаренко, & Орлюк, 2017).

Методи

Загальна методологія проведення магнітних досліджень з метою пошуків вуглеводнів основана на методах дослідження магнетизму природних об'єктів (у першу чергу ґрунтового покриву), детальної магнітометрії природних систем та фізико-хімічних моделях зміни магнітної мінералогії під дією міграції вуглеводневого флюїду.

Зокрема, існує кілька моделей таких процесів. Перша з моделей, запропонована в роботі (Donavan et al., 1979), включає утворення вторинного діагенетичного магнетиту в процесі міграції вуглеводнів і базується на заміщенні Fe^{3+} з гематиту на Fe^{2+} з магнетиту. Друга модель (Goldhaber, & Reynolds, 1991) основана на теорії, що аналізує магнітні мінерали сульфідів. Вона припускає, що заміщення піриту відіграє вирішальну роль у формуванні аутогенного новоутвореного магнітного мінералу піриту, який генерує аномалії магнітного поля та змінює магнетизм ґрунтів у присутності покладів вуглеводнів. У наведених вище процесах основну роль відіграють мікробіологічні та термохімічні процеси (Machel, 2001). Ще одна модель (Elmore, & Grawford), яка пояснює формування підвищеного ступеня магнетизму нафтогазовмісних осадових порід і ґрунтів, базується на залученні у дані процеси сидериту.

Інструментально та методично процес магнітних досліджень включає польовий і лабораторний етапи, а також комплексну обробку та інтерпретацію даних. У польових умовах проводять детальну магнітометрію по профілях або площадках. Паралельно вимірюють об'ємну магнітну сприйнятливість за допомогою портативних вимірювачів типу KT-7, ПІМВ-М і т. ін., також відбирають зразки.

Лабораторні вимірювання проводять як у магнітній лабораторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, так і лабораторіях партнерів: Центр прикладних наук про Землю університету Еберхарда Карла Тюбінгена, Геофізичному центрі Дурбеса, Королівському метеорологічному інституті Бельгії, університеті Мюнхена тощо. Усі зразки висушуються в природних умовах. Для вимірювання питомої магнітної сприйнятливості (χ) та її температурної залежності використовують капамісток KLY (Agico, Чехія), а для частотної залежності (χ_{fd}) – MS2 (Bartington).

MPMS3 (магнітометр Quantum Design) застосовують для вимірювання магнітного гістерезису, частотної залежності χ та залишкової намагніченості. MPMS3 забезпечує збір даних у діапазоні температур 1,8–400 K (–271,35 – +126,85 °C), діапазоні магнітного поля ± 7 Тл і частотному діапазоні 0,1 Гц – 1 кГц. Петлі гістерезису отримують при 30 Кельвінах (K) і при 300 K. Низькотемпературний аналіз залишкової намагніченості ґрунтів проводять у діапазоні температур від близько до 0 до 300 K. Вимірювач петлі гістерезису застосовують як альтернативний інструмент для отримання ізотермічних кривих намагніченості (гістерезис, зворотне поле) та отримання залишкової намагніченості у магнітному полі до 0,5 Тл.

Крім того, магнітно-мінералогічні вимірювання в магнітній лабораторії кафедри дослідження Землі та навколишнього середовища Мюнхенського університету Людвіга-Максиміліана включають вивчення термомагнітних параметрів, різних типів намагніченості та магнітної сприйнятливості, а також петель гістерезису за допомогою приладу Variable Field Translation Balance (VFTB).

VFTB забезпечує можливість вимірювання від -180 до $+800$ °C (одночасне вимірювання намагніченості та магнітної сприйнятливості), ізотермічної залишкової намагніченості IRM (повний діапазон температур), зворотного поля (повний діапазон температур), петлі гістерезису (повний температурний діапазон) і діаграми FORC. Завдяки своїй високій чутливості він є ідеальним інструментом для дослідження слабо магнітних матеріалів, таких як піщаник, вапняк, деякі ґрунти тощо. Для інтерпретації всіх цих даних використовують спеціальне програмне забезпечення RockMag Analyzer.

Результати

У дослідженні магнітної мінералогії ґрунтів важливим є розбрукування джерел формування цих мінералів. У більшості випадків ґрунтовий покрив вміщує мінерали ґрунтоутворного (педогенного) походження, аутогенні вторинні магнітні мінерали, а також іноді й детритові ультрадисперсні магнітні фази. Для України найпоширенішими магнітними мінералами ґрунтів педогенного походження є магнетит, магеміт, а також дещо більш складні у своїй ідентифікації гематит та гетит. У той же час досвід проведення магніто-мінералогічних аналізів ґрунтів з родовища нафти і газу вказує на наявність сульфідів залізу. У першу чергу ідентифікується моноклінний піротин. Також у ґрунтах містяться й супутні гексагональний піротин, пірит, а для більш глибокозалеглих геологічних горизонтів – грейгіт. Для ілюстрації зазначених даних наведемо кілька прикладів магніто-мінералогічних аналізів зразків з території покладів вуглеводнів.

У методиці магніто-мінералогічних досліджень одним із найбільш інформативних є термомагнітний аналіз. Комплекс термомагнітних вимірювань магнітної сприйнятливості та залишкової намагніченості при нагріванні та охолодженні до температури рідкого азоту дав змогу ідентифікувати основні магнітні фази для зразків родовища Орховича. Більш детально результати магнітометричних і магнітних досліджень опубліковані в нашій роботі (Menshov et al., 2015). На рис. 1 представлено термомагнітний аналіз магнітної сприйнятливості зразка ґрунту, відібраного поруч із свердловиною з частковим насиченням вуглеводневою речовиною. Крива нагрівання ідентифікує піротинову фазу як основний ферімагнітний мінерал.

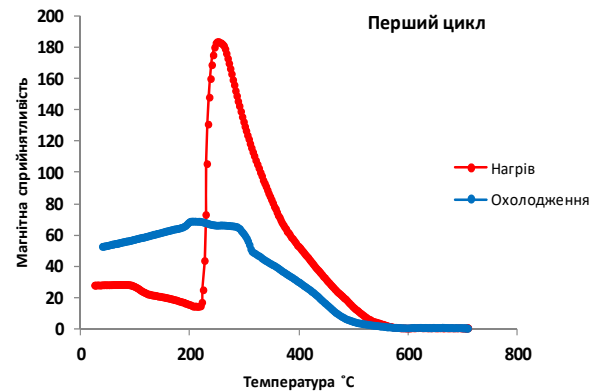


Рис. 1. Температурна залежність магнітної сприйнятливості для зразка ґрунту з горизонту А з видимими ознаками насичення вуглеводнями

На рис. 2 для цього ж зразка наведено криву визначення низькотемпературної залежності магнітної сприйнятливості. Як видно, переходи Вервея та Моріна, а також ізотропна точка магнетиту не ідентифікуються. Це підтверджує можливість домінування піротинової фази як основного магнетика території покладів вуглеводнів.

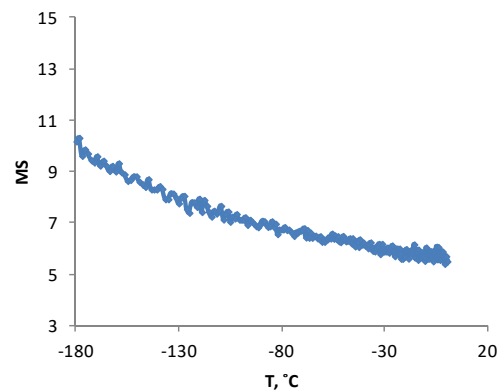


Рис. 2. Результати низькотемпературного аналізу магнітної сприйнятливості ґрунту родовища Орховичі

На рис. 3 наведено результати вивчення низькотемпературних характеристик залишкової намагніченості, отримані за допомогою магнітометричної системи Quantum Design's MPMS 3.

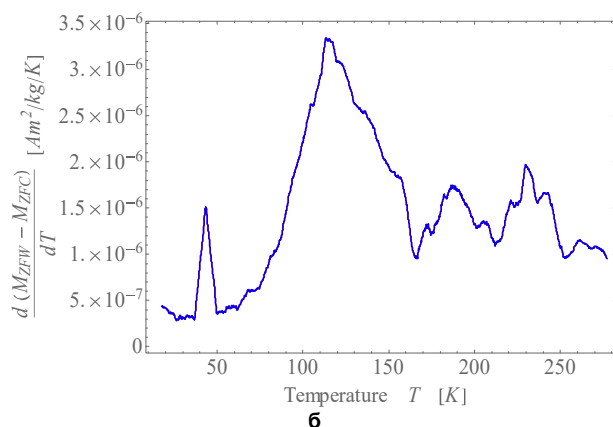
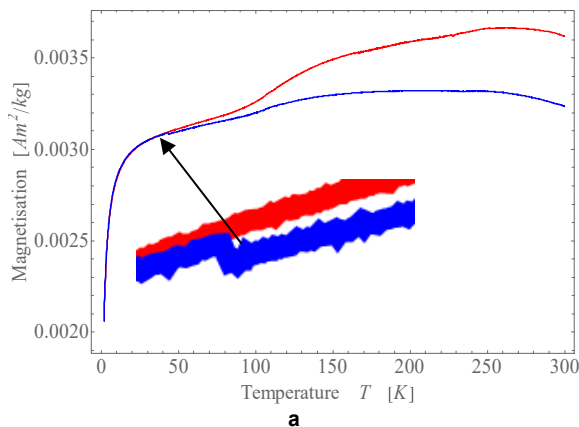


Рис. 3. Температурний аналіз залишкової намагніченості родовища Орховичі: а – криві нагріву ZFW (синя) та охолодження ZFC (червона); б – перша похідна різниці ZFC–ZFW

Дослід проводився поза впливом зовнішнього магнітного поля, а залишкову намагніченість отримано у високому магнітному полі 7 Тл за кімнатної температури. Ідентифікується абсолютний максимум на позначці у 113,5 К, що вказує на перехід Вервея для магнетиту. Водночас крутизна нахилу кривих після проходження зони Вервея та ізотропної точки магнетиту не велика. Тобто домінує дрібнозернистий магнетит в однодоменому (SD) стані природного ґрунтового генезису. Зазначена тенденція характерна для ґрунтів територій покладів вуглеводнів за умови відсутності позірних ознак насичення флюїдом. Це підтверджує зазначену нами вище тезу, що зазвичай у ґрунтового покриві одночасно перебувають магнетити педогенного та аутогенного генезису. Проте за умови збільшення роздільної здатності кривих фіксується піротинова фаза та перехід Беснуса в діапазоні температур 30–40 К.

Ґрунтовий покрив Дніпровсько-Донецької западини характеризується вищими природними значеннями магнітної сприйнятливості, а отже, у складі ґрунту наявна більша кількість магнітних мінералів, які потенційно можуть бути аутогенетично зміненими. Для розуміння

магнітної мінералогії даного об'єкта розглянемо результати термомагнітного аналізу зразків, відібраних поблизу свердловини (точка PR 28), та на ділянці, розташованій поза зоною впливу вуглеводнів (точка PR 0403) родовища Недільна. Більш детально результати магнітних вишукувань даного родовища наведено в нашій публікації (Меньшов, 2021). Для дослідження магнітних параметрів використовувався прилад Variable Field Translation Balance (VFTB). Термомагнітні аналізи залишкової намагніченості показують, що після нагрівання зразка до температури 700 °C під час охолодження відбувається незначне зменшення намагніченості зразків. Також спадання намагніченості фіксується за температури близько 580 °C, що свідчить про наявність магнетиту як основної магнітної фази (рис. 4). Залишкова намагніченість проби, яку взято біля свердловини (рис. 4а), вища, ніж для проби фоновий ділянки (рис. 4б). Така поведінка IRM вказує на можливий вплив міграції флюїду на магнітні мінерали ґрунтів, а також на можливий гало-ефект. Результати геохімічних досліджень у точці PR28 зафіксували максимумами газогеохімічних параметрів.

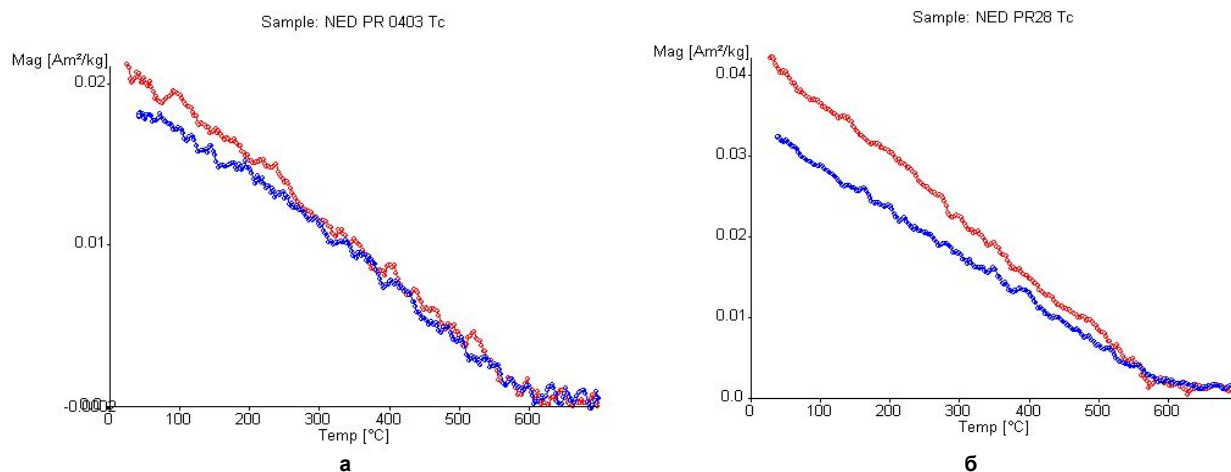


Рис. 4. Температурна залежність залишкової намагніченості: а – проба, відібрана біля свердловини; б – проба, відібрана на фоновій ділянці

З метою підвищення однозначності інтерпретації результатів термомагнітного аналізу IRM розглянемо додатково аналіз температурних змін магнітної сприйнятливості (рис. 5.)

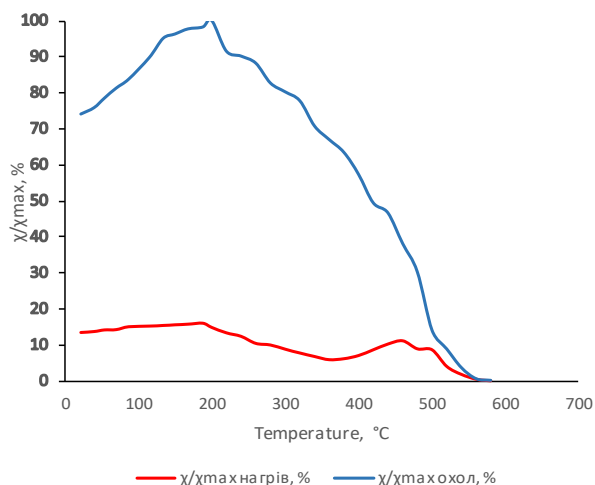


Рис. 5. Температурна залежність магнітної сприйнятливості для зразка, відібраного у межах родовища вуглеводнів поблизу свердловини, точка PR 28

Зміни магнітної сприйнятливості в діапазоні від 200 до 400 °C можуть відображати присутність сульфідів заліза або магеміту (Mathé, & Lévêque, 2005). Також така поведінка термомагнітних кривих вказує на наявність дрібнодисперсних мінералів у однодоменому стані (SD) за кімнатної температури, які переходять у суперпарамагнітний стан (SP), якщо температура зростає (Rijal et al., 2012). Пік за 500 °C найчастіше ідентифікує новоутворення магнетиту. У той же час він може бути результатом окиснення піриту та інших сульфідів вуглеводневого походження до магнетиту. Температура Кюрі близько 580 °C підтверджує наявність магнетитової фази, проте цей пік не переважає, що підтверджує припущення про генезис зміни температур у діапазоні 200–400 °C за рахунок домінування у зразку піриту або магеміту.

Аналогічний тип термомагнітних кривих при нагріванні та аналізі магнітної сприйнятливості було отримано для Рубанівського родовища Передкарпатського прогину (рис. 6).

Головною відмінністю є більш низькі абсолютні значення магнітної сприйнятливості порівняно з Недільною площею, оскільки дернові та лучні ґрунти є в кілька разів менш магнітними порівняно із чорноземами України.

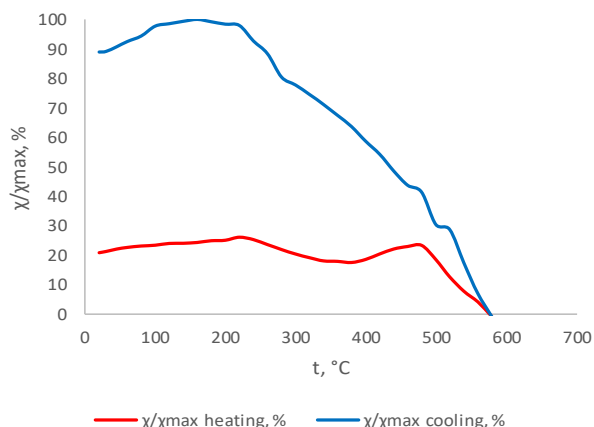


Рис. 6. Температурна залежність магнітної сприйнятливості для зразка, відібраного у межах родовища вуглеводнів поблизу свердловини Рубанівського родовища

Дискусія і висновки

Завдання ефективної та однозначної інтерпретації результатів магніто-мінералогічних аналізів не завжди є простим і вимагає комплексного залучення всієї наявної додаткової інформації. Магнітні мінерали можуть формуватися шляхом окиснення Fe^{2+} , або шляхом регенерації Fe^{3+} магнітотактичними бактеріями (Lovley et al., 1989). Магнітотактичні бактерії відновлюють Fe^{3+} . Причому вони здатні відновлювати висококристалічні мінерали Fe^{3+} , зокрема гематит, гетит і магнетит, а також погано кристалізований феригідрит (Weber et al., 2006). Вуглеводні в осадових породах і ґрунтовому покриві, у свою чергу, впливають на окиснювачі Fe^{2+} , а також на відновники Fe^{3+} . Послідовно Fe^{2+} може окиснюватися анаеробними та аеробними Fe^{2+} магнітотактичними бактеріями, які також можуть регулювати утворення магнетиту (Kappler, & Straub, 2005). Окисно-відновні процеси й магнетотактичні бактерії та інші організми впливають на зміну феромагнетиків мінералів і в результаті змінюють магнітну сприйнятливості і намагніченість ґрунтового покриву під впливом міграції флюїду від власне покладу до верхньої частини геологічного розрізу.

Отже, магніто-мінералогічні дослідження надають важливу інформацію щодо ідентифікації магнітних фаз із врахуванням типу ґрунту. Магнітна сприйнятливості та залишкова намагніченість зразків, які відбираються біля свердловин, найчастіше характеризуються вищими значеннями порівняно з фоновими зразками. Проте фіксуються і протилежні випадки з пониженими величинами та формуванням від'ємних аномалій напруженості магнітного поля. У всіх цих випадках залишкова намагніченість та магнітна сприйнятливості вказують на прямий ефект мікропророщування, а також згадуваний гало-ефект. Одночас необхідно враховувати результати геохімічних обстежень та інші геофізичні методи і петрофізичні параметри. Варіації магнітної сприйнятливості за температур від 200 до 400 °C у зонах покладів вуглеводнів часто є ідентифікаторами присутності сульфідів заліза. У свою чергу, магнетит трапляється у всіх ґрунтах і може бути педогенного, аутогенного або детритового походження. Корисно залучати аналіз петлі гістерезису, оскільки її форма "осиної талії" ідентифікує суміш двох магнітних мінералів (наприклад, магнетиту та гематиту), а також домішки суперпарамагнітних і більших крупних зерен тих самих мінералів.

Аналіз впливу міграції вуглеводневого флюїду на зміну мінерального складу ґрунтів вказує на значущу

інформативність та перспективність впровадження методу у комплекс геологорозвідувальних робіт на різних етапах. Аутогенні зміни магнітних мінералів у верхній частині геологічного розрізу та ґрунтовому покриві, а також природне та антропогенне накопичення вуглеводневих продуктів у ґрунтах спричинює зміну магнітних властивостей та формує аномалії магнітного поля. Сформовані таким чином діагенетичні магнетики можуть підвищувати або понижувати величини магнітних параметрів ґрунтів у межах ареалів розсіювання вуглеводнів і так званої зони гало-ефекту. Магнітні аномалії ґрунтів перебувають у тісному зв'язку з аномаліями магнітного поля, геохімічними аномаліями ґрунтів та підстильних горизонтів. Ідентифікується наявність аутогенних сульфідів заліза (грейгіт, піротин), що формуються у ґрунтах під впливом вуглеводнів. Паралельно присутні ультрадисперсні оксиди заліза ґрунотвірного походження, насамперед магнетит і магеміт. Усі магнетики не перевищують псевдооднородний стан (PSD). Магнітні методи на сьогодні є носієм важливої інформації у комплексі нафтогазопрошукових робіт у межах класичних, карбонатних і нетрадиційних родовищ нафти та газу в Україні.

Список використаних джерел

- Друкаренко, В., & Орлюк, М. (2017). Про структурно-генетичний зв'язок шляхів міграції та накопичення вуглеводнів з магнітною неоднорідністю земної кори північно-західної частини Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(76), 33–41.
- Меньшов, О. (2021). Роль магнітних методів при дослідженні території ушліплених порід-колекторів нафти і газу: постановка завдання. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(92), 42–49.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Орлюк, М. І., & Друкаренко, В. В. (2018). Прогноз шляхів проходження і місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегмента Дніпровсько-Донецького авлакогену за геомагнітними даними. *Геофізичний журнал*, 40(2), 123–140.
- Орлюк, М. І., & Пашкевич, І. К. (2012). Глибинні джерела регіональних магнітних аномалій: тектонотипи та зв'язок із трансформними розломами. *Геофізичний журнал*, 34(4), 224–234.
- Пашкевич, І. К., Орлюк, М. І., & Лебедь, Т. В. (2014). Магнітна неоднорідність, розломна тектоніка консолідованої земної кори та нафтогазоносність Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Геофізичний журнал*, 36(1), 64–80.
- Badejo, S. A., Muxworthy, A. R., Fraser, A., Stevenson, G. R., Zhao, X., & Jackson, M. (2021). Identification of magnetic enhancement at hydrocarbon-fluid contacts. *AAPG Bulletin*, 105(10), 1973–1991.
- Costanzo-Alvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M. P., ... & Walther, A. M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.
- De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yezpez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.
- Donovan, D. J., Forgey, R. L., & Roberts, A. A. (1979). Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *AAPG Bull.*, 63, 245–248.
- Elmore, R. D., & Grawford, L. (1990). Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis. *Journal Geophys. Res.*, 95(B), 4539–4549.
- Gadirov, V., Kalkan, E., Ozdemir, A., Palabiyik, Y., & Gadirov, K. (2022). Use of gravity and magnetic methods in oil and gas exploration: Case studies from Azerbaijan. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 4(2), 143–156.
- Gadirov, V. G., Eppelbaum, L. V., Kuderavets, R. S., Menshov, O. I., & Gadirov, K. V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66, 1463–1483.
- Craig, J., & Quagliaroli, F. (2020). The oil & gas upstream cycle: Exploration activity. In EPJ Web of Conferences, Vol. 246, p. 00008. EDP Sciences.
- Goldhaber, M. B., Reynolds, R. L. (1991). Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain. *Geophysics*, 56, 748–757.
- Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 85–108.
- Lovley, D. R., Baedeker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J., & Siegel, D. I. (1989). Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction. *Nature*, 339(6222), 297–300.

- Lukin, A. E. (2014). Hydrocarbon potential of great depths and prospects of its mastering in Ukraine. *Geophysical Journal*, 36(4), 3–23. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.112455>
- Machel, H. G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.*, 14, 143–175.
- Mathé, V., & Lévêque, F. (2005). Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European journal of soil science*, 56(6), 737–751.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 731–746.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.
- Rijal, M. L., Porsch, K., Appel, E., & Kappler, A. (2012). Magnetic signature of hydrocarbon-contaminated soils and sediments at the former oil field Hünigen, Germany. *Studia geophysica et geodaetica*, 56, 889–908.
- Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., & Maślanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.
- Weber, K. A., Achenbach, L. A., & Coates, J. D. (2006). Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nature Reviews Microbiology*, 4(10), 752–764.

References

- Badejo, S. A., Muxworthy, A. R., Fraser, A., Stevenson, G. R., Zhao, X., & Jackson, M. (2021). Identification of magnetic enhancement at hydrocarbon-fluid contacts. *AAPG Bulletin*, 105(10), 1973–1991.
- Costanzo-Álvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M. P., ... & Walther, A. M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.
- Craig, J., & Quagliaroli, F. (2020). The oil & gas upstream cycle: Exploration activity. In EPJ Web of Conferences, Vol. 246, p. 00008. EDP Sciences.
- De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Álvarez, V., Yezpez, S., & Amon, C. (2021). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 106, 103036.
- Donavan, T. J., Forgey, R. L., & Roberts, A. A. (1979). Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *AAPG Bull.*, 63, 245–248.
- Drukarenko, V., & Orlyuk, M. (2017). Structural genetic relation of migration paths and hydrocarbons accumulation with Earth crust magnetic heterogeneity of north-western part of the Dnieper-Donets aulakogen. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(76), 33–41 [in Ukrainian].
- Elmore, R. D., & Grawford, L. (1990). Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis. *Journal Geophys. Res.*, 95(B), 4539–4549.
- Gadirov, V., Kalkan, E., Ozdemir, A., Palabiyik, Y., & Gadirov, K. (2022). Use of gravity and magnetic methods in oil and gas exploration: Case studies from Azerbaijan. *International Journal of Earth Sciences Knowledge and Applications*, 4(2), 143–156.

- Gadirov, V. G., Eppelbaum, L. V., Kuderavets, R. S., Menshov, O. I., & Gadirov, K. V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66, 1463–1483.
- Goldhaber, M. B., & Reynolds, R. L. (1991). Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain. *Geophysics*, 56, 748–757.
- Kappler, A., & Straub, K. L. (2005). Geomicrobiological cycling of iron. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 59(1), 85–108.
- Lovley, D. R., Baedeker, M. J., Lonergan, D. J., Cozzarelli, I. M., Phillips, E. J., & Siegel, D. I. (1989). Oxidation of aromatic contaminants coupled to microbial iron reduction. *Nature*, 339(6222), 297–300.
- Lukin, A. E. (2014). Hydrocarbon potential of great depths and prospects of its mastering in Ukraine. *Geophysical Journal*, 36(4), 3–23. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i4.2014.112455>
- Machel, H. G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.*, 14, 143–175.
- Mathé, V., & Lévêque, F. (2005). Trace magnetic minerals to detect redox boundaries and drainage effects in a marshland soil in western France. *European journal of soil science*, 56(6), 737–751.
- Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80(1), 40–45 [in Ukrainian].
- Menshov, O. (2021). The role of magnetic methods in the study of areas of the tight oil and gas: introduction. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 42–49 [in Ukrainian].
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60, 731–746.
- Orlyuk, M. I., & Drukarenko, V. V. (2018). Prediction of pathways and places of accumulation for hydrocarbons of the Chernigiv segment of the Dnieper-Donets aulakogen in relation to magnetic heterogeneity. *Geophysical Journal*, 40(2), 123–140 [in Ukrainian].
- Orlyuk, M. I., & Pashkevich, I. K. (2012). Deep sources of regional magnetic anomalies: tectonotypes and relation with transcrustal faults. *Geophysical Journal*, 34(4), 224–234 [in Russian].
- Pashkevich, I. K., Orlyuk, M. I., & Lebed', T. V. (2014). Magnetic data, fault tectonics of consolidated earth crust and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets aulakogen. *Geophysical Journal*, 36(1), 64–80 [in Russian].
- Rijal, M. L., Porsch, K., Appel, E., & Kappler, A. (2012). Magnetic signature of hydrocarbon-contaminated soils and sediments at the former oil field Hünigen, Germany. *Studia geophysica et geodaetica*, 56, 889–908.
- Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., & Maślanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.
- Weber, K. A., Achenbach, L. A., & Coates, J. D. (2006). Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction. *Nature Reviews Microbiology*, 4(10), 752–764.

Отримано редакцією журналу / Received: 04.08.23

Прорецензовано / Revised: 28.08.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Oleksandr MENSHOV, DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

FLUIDS MIGRATION IMPACT ON SOIL MAGNETIC MINERALOGY

Background. The war in Ukraine arises the urgent need to intensify hydrocarbon production on its own territory in order to maintain and develop the country's energy independence. The effectiveness, low cost and relevance of the involvement are demonstrated by magnetic methods of studies of the near surface geological section and the soil for the oil and gas prospecting.

Methods. The methodology of magnetic studies for the hydrocarbon prospecting is based on the methods of studying the environmental magnetism and soil, precision magnetic survey of natural systems and authigenic models of changes in magnetic mineralogy under the influence of hydrocarbon fluid migration.

Results. The crucial aim is to distinguish the sources of the formation of the magnetic minerals. In most cases, soils contain minerals of natural pedogenic origin, authigenic secondary magnetic minerals, and sometimes detrital fine-coarse magnetic phases. For Ukraine, magnetite, maghemite, hematite, and goethite are the most common magnetic minerals of soils of the pedogenic origin. At the same time, the experience of conducting magnetic mineralogical analyzes of soils in the territories of oil and gas deposits indicates the presence of iron sulfides. First of all, monoclinic pyrrhotite is identified. The soils also contain accompanying hexagonal pyrrhotite, pyrite, and greigite. The results of thermomagnetic analyzes and hysteresis loops of soil samples collected at the territories of hydrocarbon deposits are presented and their mineral composition is analyzed.

Conclusions. The results of the study of the impact of hydrocarbon fluid migration (microseepage) on the change in the mineral composition of soils indicate significant informativeness and the perspective of introducing the method into the complex of geological exploration works at various stages. Authigenic changes of magnetic minerals in the near surface geological section and soil, as well as natural and anthropogenic accumulation of hydrocarbon products in soils, cause changes in magnetic properties and form magnetic field anomalies.

Keywords: soil, magnetic minerals, magnetic susceptibility, fluids, hydrocarbons.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 550.4: 622.7

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.05>

Вікторія ГУБІНА¹, канд. геол.-мінералог. наук, провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-7486-5451
e-mail: gvg131619@gmail.com

Валентин ВЕРХОВЦЕВ¹, д-р геол. наук, зав. відділу
ORCID ID: 0000-0002-1015-6725
e-mail: verkhovtsev@ukr.net

Віктор ЯЦЕНКО¹, канд. геол.-мінералог. наук, зав. лаб.
ORCID ID: 0000-0002-8113-5702
e-mail: vgyatsenko@gmail.com

Володимир ПОКАЛЮК¹, д-р геол. наук, провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9282-0246
e-mail: pvskan@ukr.net

Лариса ЗАБОРОВСЬКА¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-7848-5528
e-mail: zaborovskayalp63@gmail.com

Олена ЛАВРИНЕНКО¹, д-р хім. наук, провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9256-1221
e-mail: alena.lavrynenko@gmail.com

Юрій ЛИТВИНЕНКО¹, мол. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6609-0000
e-mail: Lisick8@gmail.com

¹Державна установа "Інститут геохімії навколишнього середовища
Національної академії наук України", Київ, Україна

МІНЕРАЛЬНІ ТА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ЗМІНИ МАГНЕТИТОВИХ КВАРЦИТІВ ВАЛЯВКИНСЬКОГО ТА НОВОКРИВОРІЗЬКОГО РОДОВИЩ КРИВБАСУ В ПРОЦЕСАХ ЇХ ПЕРЕРОБКИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.В. Митрохином)

Вступ. З метою дослідження мінеральних та фізико-хімічних змін, що відбуваються із залізною рудою (магнетитовими кварцитами) Валявкинського та Новокриворізького родовищ Криворізького залізорудного басейну при видобутку та переробці руди на гірничо-збагачувальному комбінаті ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" проаналізовано технологічний процес і відібрано представницькі проби протягом усього технологічного ланцюжка видобутку та збагачення корисної копалини: магнетитовий кварцит (руда) у природному заляганні → руда після вибуху → руда після дроблення на дробильних фабриках → проміжні магнітні продукти і хвости усіх стадій збагачення → кінцевий магнетитовий концентрат.

Методи. Отриманий мінеральний матеріал вивчено комплексом лабораторно-аналітичних досліджень, який включає мінераграфічні, петрографічні, електронно-мікроскопічні дослідження залізної руди, рентгенофлуоресцентний метод та атомно-емісійний спектральний аналіз (визначення вмісту макро- і мікроелементів у вихідній руді, магнітному концентраті та хвостах), рентгенодифракційний аналіз, мікрозондовий аналіз магнітного концентрату та хвостів, термогравіметричний аналіз, хроматографічний метод (визначення питомої поверхні речовини), седиментаційний аналіз, вимірювання магнітних характеристик та ін.

Результати. Встановлено, що на першому етапі гірничодобувного виробництва (буровибухові роботи, дроблення руди в кар'єрі та на дробильній фабриці) істотних змін запасів корисних копалин не відбувається. На наступному етапі глибокої переробки корисних копалин на рудозбагачувальній фабриці, під час якого руда проходить три стадії подрібнення, класифікації, дешламації, мокрої магнітної сепарації, утворюються два абсолютно нових продукти – магнетитовий концентрат і хвости, які докорінно відрізняються від вихідної руди – як на породному, так і на мінеральному рівнях.

Висновки. Було обґрунтовано, що в процесі збагачення магнетитових кварцитів істотно змінюється структурно-текстурні характеристики, мінеральний, хімічний склад, агрегатний стан руди, структурні та кристалохімічні властивості основного рудного мінералу – магнетиту.

Ключові слова: Криворізький залізорудний басейн, магнетитові кварцити, збагачення, магнетит, концентрат, техномінералогія.

Вступ

Переробка та збагачення руд металів спрямовані на відокремлення корисної компоненти від нерудної речовини. Водночас відбувається закономірна зміна фізичного та хімічного складу руд, концентрація цінного компоненту порівняно з вихідними рудами може збільшуватись у десятки, сотні й навіть тисячі разів.

На збагачувальних фабриках корисні копалини проходять кілька послідовних технологічних процесів, які за своїм призначенням поділяються на підготовчі, основні і допоміжні. Одним із ключових підготовчих процесів є дроблення і подрібнення руди.

Механічний вплив на руду – буровибухові роботи у кар'єрах, послідовне зменшення розміру шматків руди на дробильних фабриках та тонке подрібнення на рудозбагачувальних фабриках – спрямовані на дезінтеграцію породи і розкриття зерен мінералів для забезпечення умов найбільш повного вилучення корисного компоненту. Щороку на подрібнення руди у світі витрачається понад 5 % від загального річного виробництва електроенергії та мільйони тон сталі (Musa, & Morrison, 2009; Si et al., 2021).

Згідно з численними дослідженнями, подрібнення руди при збагаченні уявляється не як проста зміна розмірів частинок, а як складний фізико-хімічний процес, в

якому змінюються і фізичний стан, і хімічні властивості речовини, що подрібнюється. Зокрема, змінюється енергетичний стан подрібненої речовини. Ці явища можуть суттєво впливати на технологічний цикл і якість кінцевого продукту.

Вивчення таких змін у процесах переробки залізистих кварцитів Кривбасу є актуальним, оскільки може бути спрямоване на вдосконалення існуючих схем збагачення для більш повного вилучення корисного компоненту, на комплексне використання мінеральної сировини та вдосконалення оцінки екологічних ризиків від розміщення відходів збагачення в місцях видалення відходів.

Крім того, останнім часом, у зв'язку з вимогами економічного та фіскального характеру, виникла потреба підтвердити чи спростувати наявність "якісної зміни мінеральних форм корисних копалин, їх агрегатно-фазового стану, кристалохімічної структури", зокрема для магнетитових залізистих кварцитів родовищ Криворізького басейну в процесах їх переробки (Михайлов та ін., 2022).

Метою роботи є аналіз мінеральних та фізико-хімічних змін залізистих магнетитових кварцитів Валявкинського і Новокриворізького родовищ Кривбасу в процесах їх переробки та збагачення на гірничо-збагачувальному комбінаті ПАТ "АрселорМіттал Кривий Пір" (ПАТ АМКР).

Аналіз попередніх досліджень. Фізико-хімічні явища, що виникають під час переробки та збагачення руд, вивчаються в рамках таких наукових напрямків, як механохімія, механічна активація і технологічна мінералогія.

Проведені до теперішнього часу дослідження дають змогу скласти досить повний перелік фізико-хімічних змін мінеральної речовини, що проходять під дією механічних сил, та навести відповідні приклади трансформації матеріалів при диспергуванні:

- перехід речовини в нову кристалічну форму під впливом механічних сил;
- аморфізація кристалічної речовини;
- гідратація при подрібненні мінеральних речовин у воді;
- дисоціація карбонатів та їх деструкція при подрібненні;
- твердофазні реакції, ініційовані за допомогою подрібнення;
- іонне заміщення в мінералах, ініційоване тонким подрібненням;
- зміни тонкої кристалічної структури в результаті механічної активації при подрібненні;
- екстракція та селективне вилуговування окремих компонентів внаслідок механохімічної деструкції мінеральних речовин при диспергуванні;
- механохімічне розкладання сульфідів при їх подрібненні в рідкому середовищі;
- підвищення хімічної активності подрібнених мінеральних речовин, що проявляється у зміні їх сорбційної здатності.

О.Ю. Светкіна (Светкина, 2013) теоретично обґрунтувала та експериментально підтвердила, що в процесі подрібнення мінеральної речовини, внаслідок віброударної активації, змінюються абсорбційні та електричні характеристики поверхні мінералів; спостерігається зміна електропровідності; утворюються тверді розчини алюмінію та заліза – алюмінатів заліза; спостерігається додаткова (об'ємна) іонізація на активній поверхні мінералу; оксиди заліза (магнетит і гематит) можуть перетворюватися топотактичним шляхом (без руйнування кристалічної решітки та зміни хімічного складу) на інші мінеральні

форми, за рахунок перерозподілу іонів між тетраедричними і октаедричними порожнинами.

Питанням мінеральних та фізико-хімічних змін речовини, які відбуваються під час переробки руд заліза, в тому числі залізистих кварцитів з родовищ Криворізького басейну, присвячено ряд фундаментальних праць Б.І. Пирогова та інших дослідників починаючи з середини минулого сторіччя.

Основним методом збагачення магнетитових залізистих кварцитів є магнітна сепарація, у зв'язку з чим дослідженню магнітних властивостей руд і їх змін під час збагачення приділяється багато уваги, з метою вдосконалення технологічних схем на рудозбагачувальних фабриках. Так, встановлено, що у процесі подрібнення залізних руд одночасно із зменшенням розміру частинок мінералів відбувається суттєва зміна магнітних характеристик магнетиту – зменшення питомої магнітної сприйнятливості, збільшення коерцитивної сили, зростання точки Кюрі внаслідок руйнування (порушення) первинної доменної структури кристалів магнетиту (Белевцев, 1989; Губіна, & Кадошніков, 2004; Швець, 1962).

Механічний вплив під час дроблення спричиняє збільшення дефектності кристалічної структури зерен мінералів (магнетиту, кварцу тощо), що виражається у зменшенні блоків когерентного розсіювання та збільшенні мікронапруженостей внаслідок виникнення мікротріщин, зсувних і пластичних мікродислокацій та мікродеформацій.

Про зміну структурного стану мінералів свідчить також зменшення мікротвердості магнетиту, гематиту та кварцу після і внаслідок подрібнення.

У ході лабораторних досліджень і виробничих експериментів, з високим ступенем достовірності встановлено, що при подрібненні залізних руд відбуваються фазові перетворення за рахунок окиснення частини магнетиту. У міру тонкого мокрого подрібнення рудної речовини, внаслідок розкриття зерен та збільшення їх поверхні, можливі мінеральні перетворення у напрямку магнетит-мартит-гематит (Белевцев, 1989).

За даними електрокінетичних вимірювань (крайовий кут змочування, водневий показник, ζ -потенціал) у процесі подрібнення залісної руди значною мірою змінюється фізико-хімічний стан поверхні магнетиту і кварцу.

Методи

ПАТ "АМКР" кар'єрним способом видобуває залізни руди Валявкинського і Новокриворізького родовищ. Гірничо-збагачувальний комплекс складається з добувального, дробильного і збагачувального виробництв. Видобуток здійснюють за допомогою буровибухових робіт. На внутрішньокар'єрних дробарках відбувається первинне дроблення рудничної маси до розмірів не більш як 1200 мм,

На дробильних фабриках (ДФ) № 3 і 4 руда проходить чотири стадії дроблення з послідовним зменшенням розміру уламків не більш як 12,5 % класу +20 мм.

Технологічна схема збагачення магнетитових залізистих кварцитів на рудозбагачувальних фабриках (РЗФ) № 1 і 2 включає три стадії подрібнення і класифікації, три стадії мокрої магнітної сепарації та дешламації і стадію зневоднення. Подрібнення в циклі млин-гідроциклон ведеться до крупності не менш як 85 % класу – 0,050 мм (або не менш як 95 % класу – 0,074 мм) для виробництва концентрату рядової якості і до крупності не менш як 98 % класу – 0,050 мм для виробництва концентрату підвищеної якості.

Для простеження всього ходу змін корисних копалин під час видобутку і збагачення було відібрано проби руди

та продуктів її переробки на всіх послідовних етапах технологічного процесу:

1. Опробування в кар'єрах. У кар'єрі № 2-біс Валявкинського родовища проби відбиралися у двох рудних екскаваторних вибоях на глибині 150 та 165 м, у кар'єрі № 3 Валявкинського родовища – у двох вибоях на глибині 270 та 285 м. У кожному вибої відбиралося по дві проби. Одна проба – з великих блоків руди, що знаходяться у відносно непорушеному заляганні в уступі кар'єру. Як передбачається, ця проба є гірською породою (рудною) у її первісному заляганні, що найменше зазнала техногенного впливу. Друга проба – з дробленої внаслідок вибухових робіт руди безпосередньо з-під ковша екскаватора. На додаток було відібрано усереднені проби руди на рудорозвантажувальних майданчиках кар'єрів Валявкинського та Новокриворізького родовищ.

2. Відбір зразків руди на виході з дробильних фабрик ДФ-3, ДФ-4.

3. Відбір проб на РЗФ № 1 і РЗФ № 2. На всіх стадіях технологічного циклу збагачення залізної руди відібрано проби проміжних магнітних продуктів і хвостів, кінцевих магнетитових концентратів і загальних хвостів, а також проби технічної води, що надходить до РЗФ, і рідкої фракції хвостів.

4. На переробку до РЗФ № 1, РЗФ № 2 ПАТ "АМКР" надходить усереднена залізна руда одночасно з двох кар'єрів, невідомо у яких пропорціях на момент відбору проб. З метою простеження змін, які відбуваються з рудою (магнетитовими кварцитами) з конкретних родовищ під час їх переробки на РЗФ, в рудо-випробувальній лабораторії (РВЛ) ПАТ "АМКР" було проведено технологічний експеримент з відтворення процесу збагачення окремо для проб руди з Новокриворізького і Валявкинського родовищ.

Отже, для аналізу було відібрано представницький матеріал уздовж усього технологічного ланцюжка

видобутку та збагачення корисної копалини: магнетитовий кварцит (руда) у природному заляганні → руда після вибуху → руда після дроблення на дробильних фабриках → проміжні магнітні продукти і хвости всіх стадій збагачення на РЗФ → кінцевий магнетитовий концентрат.

Для дослідження перетворень корисної копалини під час її видобутку і збагачення було проведено широкий комплекс лабораторно-аналітичних досліджень проб мінеральної речовини: мінераграфічні, петрографічні, електронно-мікроскопічні дослідження, визначення вмісту всіх головних компонентів і мікроелементів, рентгенодифракційний, електронно-зондовий, термогравіметричний, седиментаційний аналізи, визначалась питома поверхня речовини, вимірювались магнітні характеристики тощо. Опис конкретної апаратури і методик лабораторних досліджень наведено нижче у відповідних підрозділах.

Результати

Мінералого-петрографічні дослідження. Вихідною рудою ГЗК ПАТ АМКР є магнетитові кварцити, які являють собою міцні, стійкі метаморфічні породи з коефіцієнтом міцності за шкалою проф. Протод'яконова 12–18. Дослідження проб вихідної руди, відібраної у виробничих вибоях кар'єрів Новокриворізького і Валявкинського родовищ, показали, що вона представлена сіро- та червоносмугастими, шаруватої текстури породами з тонким перешаруванням прошарків різного складу а саме: карбонат-кумінгтоніт-магнетитовими, карбонат-біотит-кумінгтоніт-магнетитовими, гематит-магнетитовими та безрудними карбонат-кумінгтонітовими кварцитами (Новокриворізьке родовище); карбонат-гематит-магнетитовими, карбонат-магнетитовими, флогопіт-карбонат-магнетитовими, кумінгтоніт-біотит-карбонат-магнетитовими та гематит-магнетитовими кварцитами (Валявкинське родовище) (рис. 1).

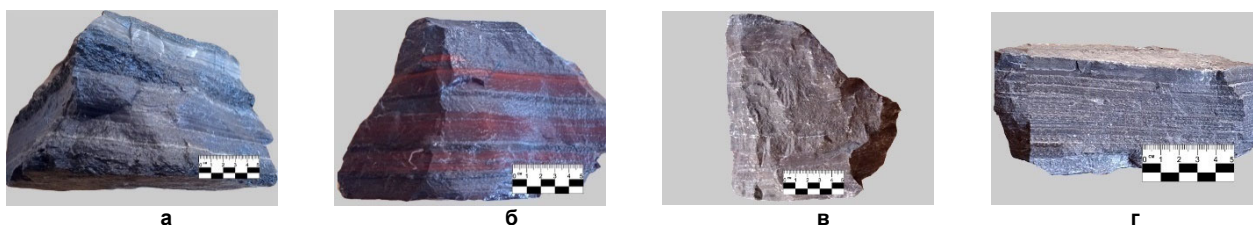


Рис. 1.-Загальний вигляд залізних руд Валявкинського і Новокриворізького родовищ:

а, б – Валявкинське родовище: а) горизонт мінус 150 м, сіросмугастий силікатно-магнетитовий кварцит,

б) горизонт мінус 165 м, червоносмугастий гематит-магнетитовий кварцит;

в, г – Новокриворізьке родовище: в) горизонт мінус 285 м, сіросмугастий магнетитовий кварцит,

г) горизонт мінус 270 м, сіросмугастий магнетитовий кварцит.

Довжина масштабної лінійки 5 см

Відмінною особливістю залізистих кварцитів є їх дрібно- та тонкозерниста гранобластова і гетерогранобластова структура зі складним характером агрегації та тітко виражена смугастість, зумовлена ритмічним чергуванням прошарків різного складу і потужності: рудних магнетитових, малорудних магнетит-гематитових, кварцових, силікатних, карбонатних, змішаного складу. Водночас вихідні кварцити Новокриворізького родовища на 10,5–50,0 %, у середньому – 31,25 %, представлені рудними мінералами, Валявкинського – на 23,0–41,0 %, у середньому – 32,9 %, серед яких магнетит є основним рудним мінералом.

Рудні прошарки складені до 70–80 % магнетитом, з підпорядкованою кількістю кварцу та кумінгтоніту. Потужність рудних прошарків від 0,5–1 до 1–8 мм (Новокриворізьке родовище) та від 1–4 до 11 мм (Валявкинське родовище). Магнетит утворює смугоподібні виділення,

які складені ізометричними зернами магнетиту, їх блоковими агрегатами. Часто магнетитові агрегати вигинаються, утворюючи мікроплойчатість, і мають ситоподібну будову (пойкілітова структура) (рис. 2а, б). Розмір зерен магнетиту коливається від 0,06 до 1 мм (Новокриворізьке родовище), 0,1–3 мм (Валявкинське родовище).

Малорудні прошарки складені нерудними мінералами з розсіяною вкрапленістю магнетиту і гематиту. Трапляється пірит. Магнетит у малорудних прошарках утворює дрібну (до 0,1 мм) вкрапленість ідіоморфних кристалів та ізометричних зерен, зрідка їх зростків (до 0,3 мм).

Крім рудних магнетитових і малорудних силікат-кварцових прошарків, у породі спостерігаються кварцові шари з домішкою тонкодисперсного гематиту, що надає цим смугам вишнево-червоного кольору.

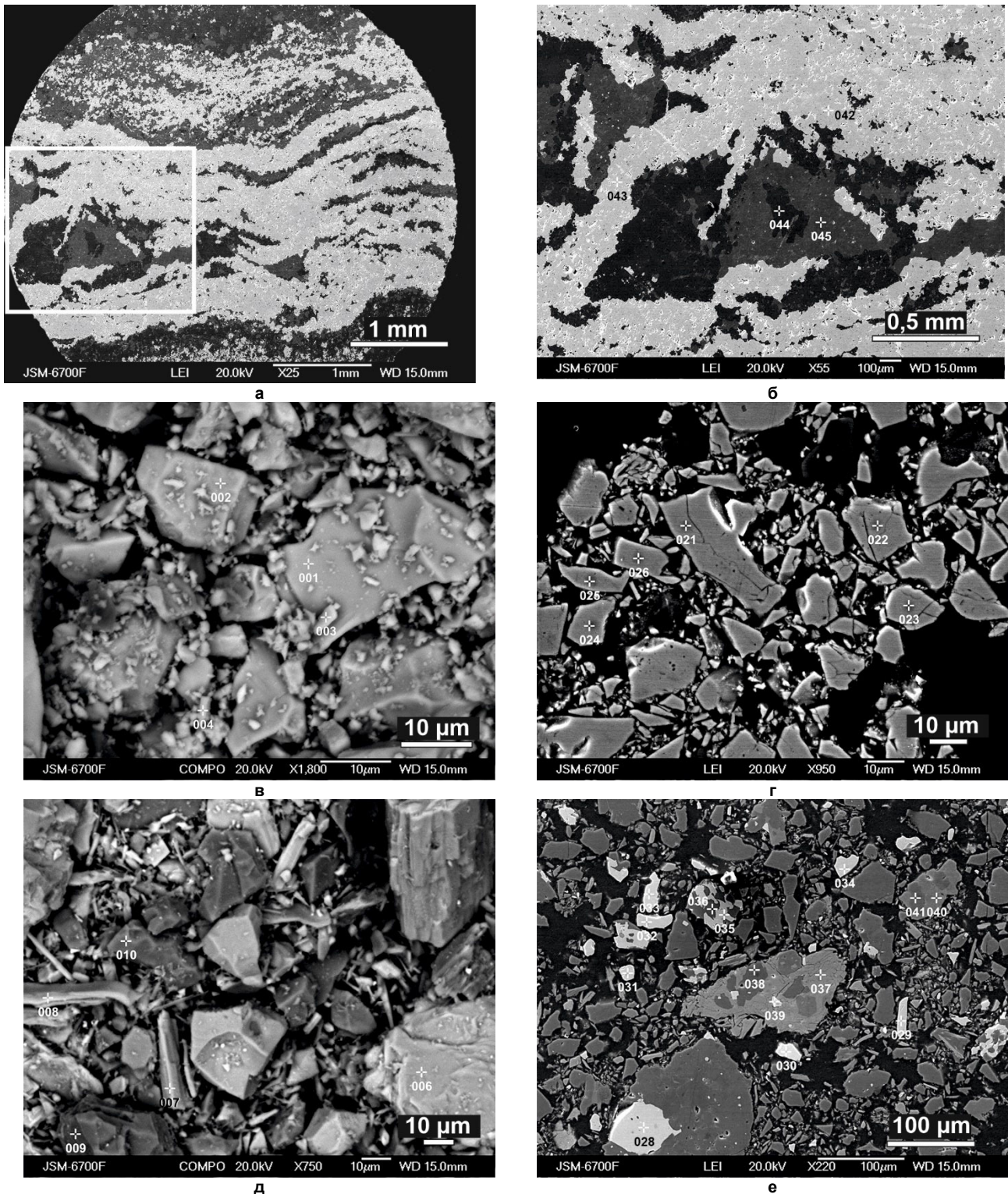


Рис. 2. Електронно-мікроскопічні знімки вихідної руди і продуктів її збагачення:

а – зразок руди Валявкинського родовища (карбонат-магнетитовий кварцит мікроплойчастої текстури, гранобластової зросткової і пойкилітової структури); б – фрагмент рис. 2а (т. 042, 043 – магнетит, т. 044 – кварц, т. 045 – Mg-сидерит з Mn); в – магнетитовий концентрат рудозбагачувальної фабрики РЗФ № 2 (т. 1–4 – магнетит); г – магнетитовий концентрат рудозбагачувальної фабрики РЗФ № 1 (т. 021 – магнетит (Fe – 75,29%), т. 022 – магнетит (Fe – 76,01 %), т. 023 – магнетит (Fe – 75,93 %), т. 024 – магнетит (Fe – 75,57 %), т. 025 – магнетит (Fe – 77,67 %), т. 026 – магнетит (Fe – 75,33 %); д – хвости збагачення руди Новокриворізького родовища в РВЛ АМКР (т. 006 – біотит, т. 007 – кумінгтоніт, т. 008 – залізна стружка, т. 009–010 – кварц; е – загальні хвости рудозбагачувальної фабрики РЗФ № 1 (т. 028 – магнетит, т. 029, 031, 032, 034, 035, 039 – гематит, т. 030, 033 – мелантерит, т. 036, 041 – кварц, т. 037 – шамозит, т. 038 – альбіт, т. 040 – анкерит)

Мінералого-петрографічні дослідження зразків, відібраних зі стінок кар'єрів, де руда перебуває у незміненому

(первинному) геологічному заляганні, а також зразків руди з вибоїв екскаваторів після проведення буровибухових

робіт, і зразків дробленої руди на виході з дробильних фабрик, свідчать, що в процесі первинної переробки руди в кар'єрах і на дробильних фабриках змінюється лише розмір фрагментів руди від великих брил до шматків розміром мінус 20 мм, і деякою мірою збільшується тріщинуватість порід, у той же час жодних змін у мінеральному складі руди і її структурно-текстурних характеристиках не спостерігається.

На РЗФ руда проходить ряд послідовних технологічних процесів: тонке мокре подрібнення у шарових млинах, класифікацію у гідроциклонах, багатостадійну магнітну сепарацію. У результаті глибокого збагачення на РЗФ відбувається перетворення вихідної корисної копалини (залізної руди – залізистих кварцитів магнетитових) на два окремі продукти: магнетитовий концентрат і хвости.

Магнетитовий концентрат являє собою тонкоподрібнений (до мінус 0,071–0,05 мм) майже мономінеральний порошок (близько 90 %) магнетиту. Переважна більшість зерен магнетиту, за винятком поодиноких дрібних октаедричних кристалів, не зберегли свою первинну морфологію, вони мають неправильну гострокутну форму, часто розбиті тріщинками і є уламками більш крупних кристалів. За розмірами виділяються дві відмінності: зерна порядку кількох десятків мікрметрів і субмікронна фракція частинок магнетиту (рис. 2в, г).

Хвости збагачення також є тонкоподрібненою речовиною, яка складається переважно з уламків нерудних мінералів (кварцу, силікатів, карбонатів) з незначним вмістом рудних мінералів (магнетит, гематит). Більшість мінералів у зернах відокремлені один від одного, але трапляються і зростки. Форма зерен відповідає кристалічній особливостям мінералів – неправильна ізометрична у кварцу і карбонатів, стовбчаста в амфіболів, пластинчаста у слюд. Так само як і в магнетитовому концентраті, у хвостах зерна за розмірами переважно розподіляються на дві групи: зерна порядку кількох десятків мікрметрів і велика кількість субмікронних частинок (рис. 2д, е). Отже, за даними мінералого-петрографічних досліджень, у процесі збагачення на РЗФ вихідна корисна копалина (магнетитові кварцити) зазнає суттєвих змін:

- міцна масивна порода перетворюється на пухкі тонкозернисті порошки;

- у результаті тонкого подрібнення повністю руйнується первинна шарувата текстура породи;

- відокремлення зерен мінералів зумовлює зникнення первинних структур вихідної породи (гранобластової, зросткової, пойкилітової);

- докорінно змінюється мінеральний склад руди з відокремленням мономінерального магнетитового концентрату і суміші мінералів порожньої породи у хвостах;

- внаслідок переподрібнення у складі як концентрату, так і хвостів у значних кількостях виникає тонкодисперсна фракція.

Макро- і мікроелементний склад. Для дослідження змін хімічного складу магнетитових кварцитів у процесах їх переробки методами рентген-флюоресцентного спектрального аналізу (головні хімічні компоненти) і атомно-емісійного спектрального аналізу (мікроелементи) було проаналізовано проби вихідної руди, магнетитовий концентрат і хвости РЗФ ПАТ АМКР (табл. 1).

Підрахувати повний баланс речовини на даному етапі досліджень не видається можливим через те, що в системі, окрім вихідної руди, магнетитового концентрату і хвостів, ще присутня технічна вода, яка в значних обсягах (близько 30 м³ на 1 т виробленого концентрату) надходить на фабрики, де використовується у багатостадійних процесах мокрого збагачення, а потім видаляється із системи у складі рідкої фази хвостів. Окрім того, в операціях подрібнення руди як робоче тіло в дробильних барабанах використовують металеві помольні кулі різного діаметра – витратний матеріал. Витрати помольних куль при подрібненні магнетитових кварцитів сягають 1,2–2,2 кг/т руди. Беручи до уваги, що в сучасному виробництві використовують кулі з високолегованих сталей і чавунів, до складу яких можуть входити С – 2,5 %, Si – 1,0, Mn – 0,5, Cr – 15, Mo – 0,5, а також Ni, Mo, Ti, V, B та ін., їх руйнування робить певний внесок у хімічний склад кінцевих продуктів збагачення.

Таблиця 1

Середній хімічний склад вихідної залізної руди, магнетитового концентрату і хвостів РЗФ АМКР

Середній хімічний склад вихідної залізної руди, магнетитового концентрату і хвостів ІЗФ АМК							
Елемент	Руда	Концентрат	Хвости	Елемент	Руда	Концентрат	Хвости
	N=10	N=8	N=8		N=18	N=14	N=14
	%				n·10 ⁻⁴ %		
SiO ₂	45,85	67,65	8,81	Ni	17,3	25,1	13,6
TiO ₂	0,05	0,04	0,06	Co	1,4	2,0	2,3
Al ₂ O ₃	1,59	2,01	0,26	V	6,9	6,5	6,8
Fe ₂ O ₃	42,08	14,21	89,17	Cr	17,4	37,1	32,0
MnO	0,13	0,19	0,05	Zr	11,5	4,5	22,9
MgO	3,65	4,71	0,61	Cu	70,6	46,9	23,6
CaO	1,52	2,51	0,13	Pb	34,2	7,9	6,4
Na ₂ O	0,12	0,22	0,17	Bi	2,1	2,4	2,0
K ₂ O	0,32	0,04	0,49	Zn	100,0	54,3	45,7
P ₂ O ₅	0,21	0,03	0,38	Sn	9,2	6,6	5,3
S	0,07	0,05	0,06	Ge	13,3	26,4	6,5
Cl	0,05	0,09	0,14	Ga	6,9	4,9	7,8
				Be	1,0	0,7	1,6
				Sc	1,4	0,9	2,3
				Y	20,4	9,6	36,7
				Yb	3,0	2,5	4,3
				Li	н/д	н/д	2,2

Примітки: N – кількість проб у виборці; Fe₂O₃ – сумарне залізо, перераховане на Fe₂O₃; н/д – вміст елемента знаходиться нижче чутливості виміру.

Порівняння хімічного складу магнетитових кварцитів і продуктів їх переробки (рис. 3) дає змогу за характером

розподілу елементів у концентраті і хвостах відносно вихідної руди виділити чотири групи елементів. Причому

таке групування добре співвідноситься з відомими геохімічними властивостями елементів. Попри недостатню для повноцінного статистичного аналізу величину вибірки і присутність деяких мікроелементів у пробах на межі або нижче точності визначення, можна вважати об'єктивно існуючими помічені тенденції поведінки хімічних елементів під час розділення залізних руд Новокриворізького та Валявчинського родовищ на магнетитовий концентрат і хвости.

Насамперед виділяються дві групи елементів, які демонструють контрастний розподіл між концентратом і хвостами.

Першу групу складають елементи, для яких характерне різке збільшення їх вмісту відносно вихідної руди в магнетитовому концентраті і майже симетричне зменшення їх присутності у хвостах. Це звичайно Fe – як основний хімічний компонент магнетиту, а також Ge, Ni, Ti. Для Ge і Ti характерне входження у структуру магнетиту, тому їх перехід разом з основною масою Fe в магнетитовий концентрат є цілком закономірним. Збільшення в концентраті вмісту Ni можна пояснити тим, що в процесі магнітної сепарації в концентрат разом з магнетитом переходить піротин, який може містити тонкі вrostки пентландиту – основного носія Ni в метаморфічних породах.

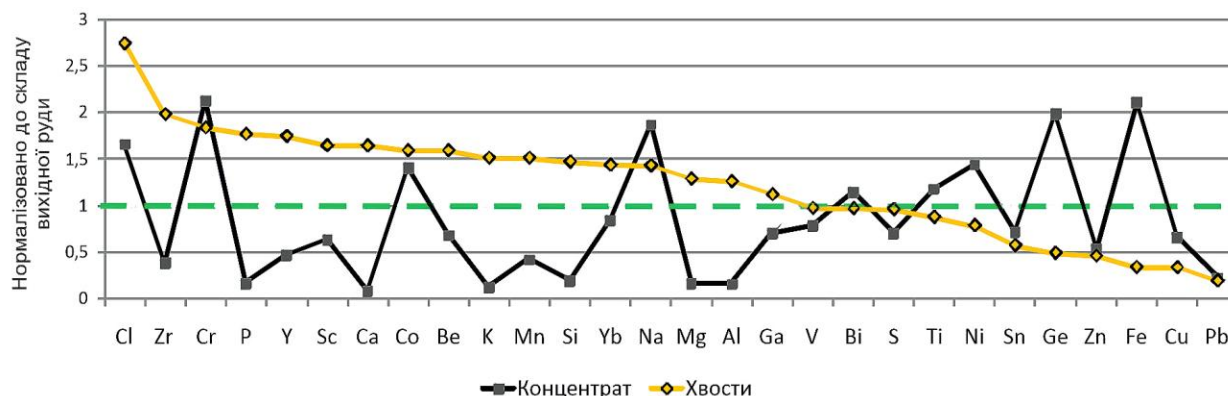


Рис. 3. Порівняння хімічного складу вихідної руди і продуктів її переробки: вміст елементів у магнетитовому концентраті і хвостах нормалізовано до складу вихідної руди

До другої групи входять елементи, які протилежно до першої групи накопичуються у хвостах і майже відсутні в концентраті, зокрема: Si, Al, Ca, Mg, K, P, Mn, Zr, Y, Yb, Sc, Be, Ga. Також до списку елементів, що накопичуються у хвостах, необхідно додати Li, який не увійшов до підрахунку, оскільки в руді та концентраті його кількість нижча за поріг виявлення, але у хвостах вміст Li підвищується до фіксованих спектральним аналізом значень (табл. 1). Усі перелічені хімічні складові другої групи є типовими літофільними елементами, їх концентрація у хвостах зумовлена самою суттю процесу збагачення як відділення чистого магнетиту від силікатної і карбонатної складових вихідної породи.

До третьої групи увійшли елементи, для яких характерне одночасне збільшення вмісту й у концентраті, й у хвостах відносно вихідної породи – Cr, Co, Na, Cl. Вірогідно, ці елементи ззовні привносяться до системи руда – концентрат – хвости. Імовірним джерелом Cr і Co може бути матеріал металевих куль усередині дробильних барабанів, які поступово руйнуються під час механічної дезінтеграції порід. Концентрація Na і Cl у хвостах скоріш за все зумовлена явищем адсорбції солей, які присутні в технічній воді, на поверхні тонкодисперсних частинок у хвостах.

Четверта група представлена Sn, Zn, Cu, Pb, які демонструють зменшення вмісту і в концентраті, і у хвостах відносно вихідної руди. Це все халькофільні елементи, які зазвичай входять до складу сульфідних мінералів. Можна припустити, що їх одночасне зменшення в концентраті і хвостах зумовлене частковим розчиненням присутніх у руді сульфідів під час мокрих операцій збагачення, та виносом цих елементів із системи у складі рідкої фази хвостів.

На відміну від більшості інших елементів, вміст V, Bi, S в концентраті і хвостах мало відрізняється від такого у вихідній руді. Для коректної інтерпретації їх поведінки недостатньо даних, але можна припустити, що ці

елементи входять до складу кількох мінералів, які по-різному розподіляються між концентратом і хвостами.

Вибірку проб було проаналізовано факторним аналізом на 11 компонентів: SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$, MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , в.п.п. (рис. 4). Перші три фактори відповідають за 96,87 % мінливості вибірки, відповідно, перший фактор – 63,53 %, другий – 25,66 %, третій – 7,68 %. Перший, головний фактор мінливості вибірки показує диференціацію між кількістю загального заліза, з одного боку, і кількістю кремнезему – з іншого, між якими існує чітка зворотна кореляція. Другий фактор показує диференціацію між глиноземистістю ($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}$), з одного боку, і карбонатністю ($\text{MgO}+\text{CaO}+\text{в.п.п.}$) – з іншого. Він добре поділяє хвости на дві субгрупи: відносно збагачені глиноземом і збагачені карбонатом. Третій фактор не піддається інтерпретації.

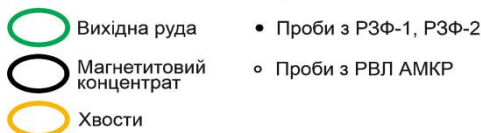
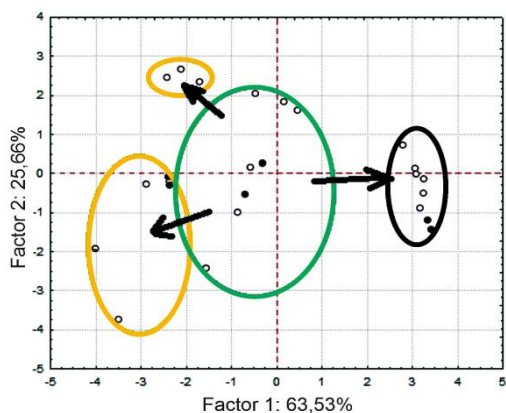
Седиментаційні методи вивчення розподілу продуктів збагачення та хвостів за розмірами на кожній стадії переробки руди дають змогу не тільки оцінити ефективність диспергування і розкриття мінералів, а також дослідити еволюцію індивідуальних мінеральних фаз концентрату та вмісних порід у процесі збагачення.

Дослідження кінетики седиментації речовини проб, відібраних на різних етапах збагачення, проводили комбінацією седиментаційних методів (седиментація у висхідному потоці води, відмивання проб, вилуговування тощо) з використанням скляних колонок. Маса вихідної проби становила 5 г, об'єм води – 500 мл. Суспензію перемішували в диспергаторі впродовж 1 год із швидкістю 450 об⁻¹.

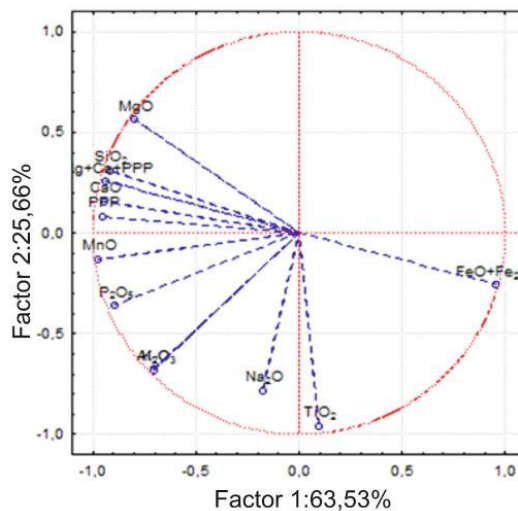
За даними седиментаційного аналізу, кінетичні криві седиментації хвостів РЗФ № 1 і РЗФ № 2 мають схожий характер. На першому етапі збагачення основну масу хвостів становить крупнозернистий матеріал: протягом першої хвилини осідає 98 % маси проби, внаслідок чого крива седиментації має дуже крутий нахил (рис. 5а). У хвостах другого етапу збагачення спостерігається подібна тенденція різкого зменшення маси осаду з часом

седиментації, але за рахунок присутності значної кількості дрібнозернистої фракції крива седиментації має більш пологий нахил, і осадження 97 % проби відбувається протягом 3 хвилин. Характер кінетики седиментації хвостів третього етапу збагачення суттєво відрізняється:

у пробі переважає порівняно дрібнозерниста фракція, за рахунок чого крива седиментації має чіткий пік в області 2 хвилин, а осадження 99 % проби відбувається протягом 6 хвилин.

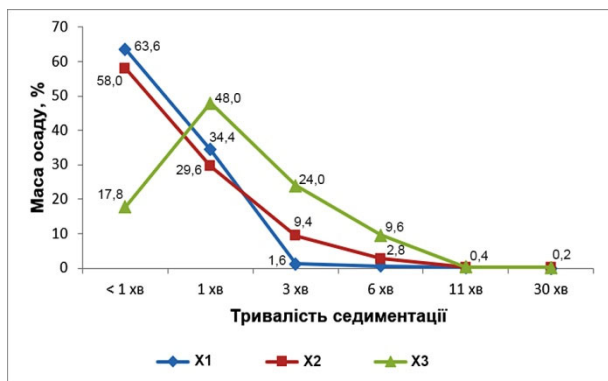


а

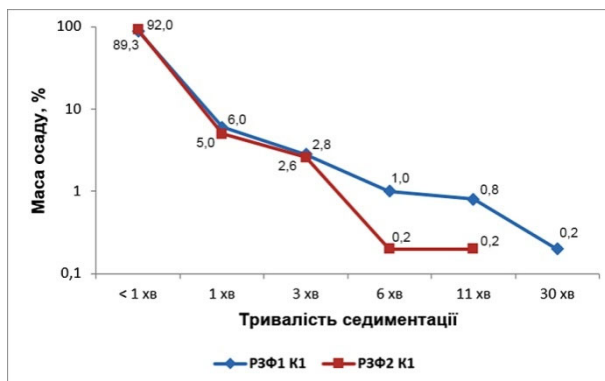


б

Рис. 4. Фактор-план фігуративних точок проб (а) та фактор-план хімічних компонентів (б) вихідної руди і продуктів збагачення



а



б

Рис. 5. Кінетична залежність маси осаду від часу седиментації:

а – хвости 1, 2, 3 стадій збагачення на РЗФ № 2; б – магнітний продукт 1 стадії збагачення на РЗФ № 1 і РЗФ № 2

Необхідно відзначити, що вже після першого етапу збагачення в пробі хвостів з'являється тонкодисперсна фаза, що осаджується протягом 6–11 хвилин. Кількість дисперсної фази на наступних етапах збагачення поступово збільшується від 0,7 до близько 10 %. Диспергуванню з появою тонкодисперсної фази піддається як силікатна складова вихідної руди, так і магнетит. Так, у пробах магнітного продукту вже після першої стадії збагачення зафіксовано появу високодисперсної фази у кількостях від 0,4 до 2,0 % (рис. 5б).

Визначення питомої поверхні проводили хроматографічним методом низькотемпературної адсорбції аргону при -196°C (метод БЕТ в одній точці). Для дослідження зміни питомої поверхні залізистих кварцитів (магнетитових) у процесі збагачення на РЗФ № 1, РЗФ № 2 було відібрано зразки вихідної руди, подрібнені ручним методом до фракції $-1+0,07\text{ мм}$, проби концентрату першої і третьої стадії збагачення, а також проби хвостів після першої та третьої стадії збагачення.

За результатами вимірювань встановлено, що питома поверхня матеріалу хвостів вже після 1 стадії збагачення збільшується в 4,5 рази порівняно з вихідною рудою; магнетитовий концентрат демонструє збільшення питомої поверхні в 3 рази на останньому етапі збагачення магнетитових кварцитів (рис. 6).

Суттєве збільшення питомої поверхні продуктів переробки свідчить про виникнення високодисперсних мінеральних фаз за рахунок кристалічної речовини вихідних магнетитових кварцитів під час їх подрібнення і мокрого збагачення. У хвостах присутня високодисперсна фаза, яка утворюється на перших стадіях збагачення внаслідок переподрібнення кварцу та інших нерудних мінералів. У кінцевому магнетитовому концентраті високодисперсна фаза утворюється на заключних стадіях переробки і складається з тонко подрібнених зерен магнетиту.

Мікрозондовий аналіз. Дослідження морфології і хімічного складу зерен мінералів у вихідній руді і продуктах її переробки на РЗФ виконувались з використанням сканувального електронного мікроскопа JSM-6700F з

енергодисперсійною системою для мікроаналізу JED-2300 фірми JEOL (Японія). Для аналізу під електронним мікроскопом, із зразків недробленої залізної руди (магнетитових кварцитів) виготовлялись аншлифи; препарати для дослідження дезінтегрованого пухкого матеріалу готувались шляхом виготовлення полірованих шашок з епоксидної смоли, з наступним напиленням платиною. Морфологічний аналіз об'єктів (розмір, форма зерен) виконувався в програмі JmicroVision.

Необхідно зробити застереження, що через апаратні і програмні обмеження результати визначення вмісту хімічних елементів у мінералах за допомогою електронного мікроскопа з енергодисперсійною приставкою можуть відрізнятися від істинного хімічного

складу речовини у бік збільшення, проте порівняльна якісна та кількісна характеристика хімічного складу досліджуваних зерен мінералів цим методом є достатньо інформативною.

За даними мікрозондового аналізу, концентрації заліза в рудних мінералах магнетитових кварцитів Валявкинського і Новокриворізького родовищ характеризуються складним нерівномірним розподілом. Вмісти загального заліза в різних зернах мінералів варіюють у діапазоні від 65 до 80 %. На гістограмі чітко виділяються два піки: великий відносно симетричний пік у межах 71–75 % з максимумом у районі 71 %, і менший пік на рівні 77–78 % (рис. 7а).

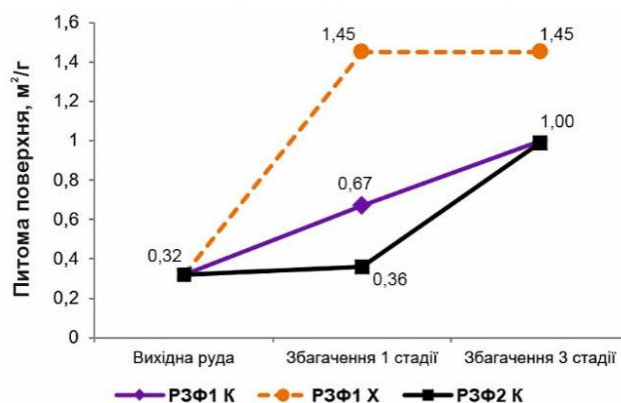


Рис. 6. Питова поверхня (м²/г) залізної руди і продуктів її збагачення: РЗФ1 К – промпродукт I стадії збагачення і концентрат РЗФ № 1; РЗФ1 Х – хвости РЗФ № 1; РЗФ2 К – промпродукт I стадії збагачення і концентрат РЗФ № 2

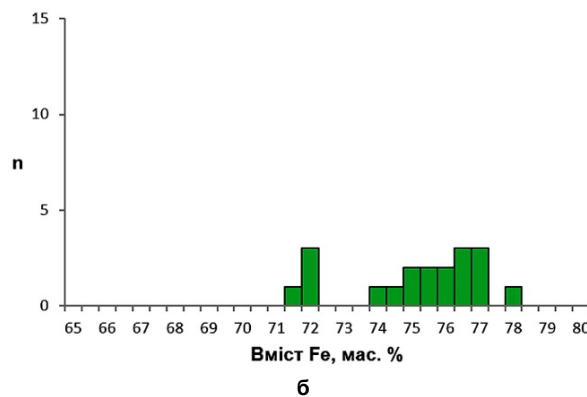
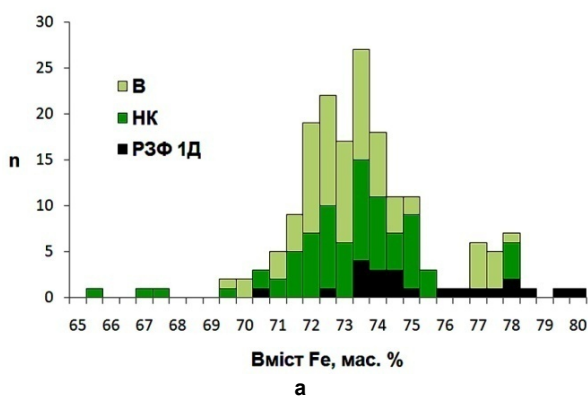


Рис. 7. Розподіл концентрацій заліза в рудних мінералах: а – проби залізної руди (В – Валявкинське родовище, НК – Новокриворізьке родовище, РЗФ 1Д – вихідна руда рудозбагачувальної фабрики РЗФ № 1); б – магнетитовий концентрат РЗФ1

Порівняно з рудними мінералами вихідних руд характер розподілу концентрацій заліза в кінцевому магнетитовому концентраті кардинально змінився. Головний пік прийняв асиметричну форму і змістився в область більш високих значень заліза загального до 74–77 %. На місці великого максимуму на 73 % залишився маленький пік на рівні 71–72 % (рис. 7б).

Зіставлення вмісту заліза з розмірами мінеральних зерен свідчить, що для вихідних залізних руд Валявкинського і Новокриворізького родовищ відсутня залежність концентрацій заліза від розмірів зерен рудних мінералів в обох діапазонах концентрацій (рис. 8а). Але після проходження всіх стадій глибокої переробки руди на РЗФ картина розподілу вмісту заліза за розміром зерен рудних мінералів суттєво змінюється. У кінцевому магнетитовому концентраті спостерігається виразна диференціація

концентрацій заліза в магнетиті за середніми лінійними розмірами його зерен. Вміст заліза відносно крупних (10–50 μm) зерен лежить у вузькому діапазоні на рівні 75–77 %. У той же час для зерен розміром менш як 10 μm вміст заліза лежить у межах від 71,5 % в найменших зернах до 74,5 % у крупніших (рис. 8б).

Рудний мінерал як у вихідних рудах, так і в кінцевому концентраті представлений, за даними рентген-дифракційного і термогравіметричного аналізу, переважно магнетитом.

За результатами мікрозондового дослідження магнетиту встановлено:

1. Характер розподілу концентрацій заліза свідчить, що в залізних рудах Валявкинського і Новокриворізького родовищ виділення магнетиту не є однорідними за складом.

2. У процесі переробки руди на РЗФ склад переважної маси магнетиту помітно змінюється. У магнетиті

кінцевого концентрату порівняно з магнетитом із вихідної руди вміст заліза загального збільшений у середньому на 3 %; лише незначна за об'ємом частина

магнетиту в концентраті, що представлена найменшими за розмірами (<10 μm) зернами, за вмістом заліза подібна магнетиту вихідної руди.

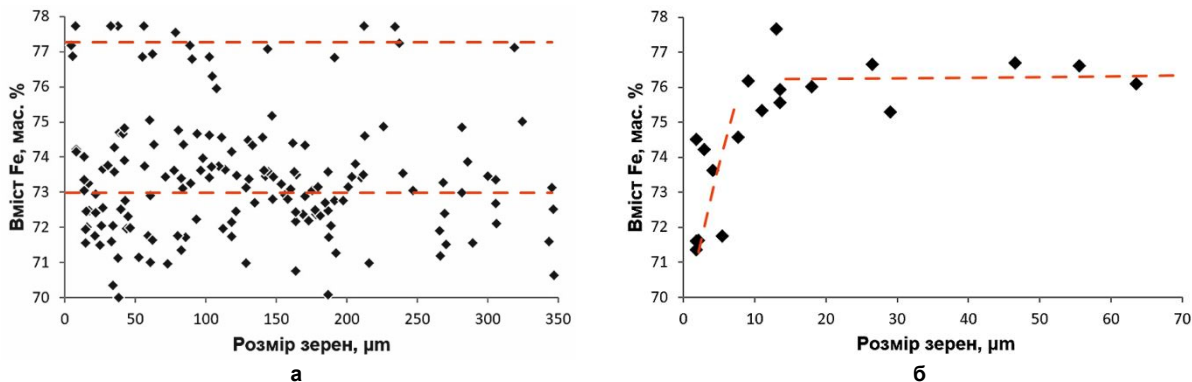


Рис. 8. Вміст заліза в рудних мінералах залежно від розміру зерен:

а – руда Новокириворізького і Валякинського родовищ; б – магнетитовий концентрат РЗФ № 1

Ці спостереження добре узгоджуються з висновками недавньої публікації В. Михайлова із співавторами (Михайлов та ін., 2022) про те, що первинні рудні мінерали залізорудних родовищ Кривбасу (перш за все магнетит), мають дуже складну будову. Їх індивіди багато в чому являють собою суміш мікро- та нанорозмірних кластерів магнетит-гематит-вюстит-SiO₂ з широкими варіаціями їх співвідношень. Руйнування таких індивідів та "звільнення" кластерів дає змогу утворити в результаті збагачення дійсно магнетитовий концентрат, який за складом принципово відрізняється не тільки від вихідної руди, але й від її рудної складової.

Розкриття деталей механізму очищення кристалів магнетиту від домішок у процесі глибокої переробки руди на РЗФ потребує додаткових спеціалізованих досліджень.

Отже, отримання на РЗФ з вихідної залізної руди товарного магнетитового концентрату зумовлене не тільки розкриттям зростків і вилученням нерудних мінералів, але й суттєвою перебудовою мінеральної форми,

кристалічної структури та агрегатно-фазового стану рудних мінералів.

Термогравіметричний аналіз проводили на дериватографі Q-1500D (Угорщина) за таких налаштувань: ТГ-500, ДТГ-500, ДТА-250. Швидкість нагріву 10 °/хв, чутливість – 50 мг. Тигель порівняння – Al₂O₃.

На термогравіметричний аналіз було спрямовано зразки вихідної руди – залізистих магнетитових кварцитів, а також промпродукт 1 стадії збагачення, магнетитовий концентрат, хвости першої і третьої стадії збагачення на РЗФ № 1.

Зразки вихідної руди вручну подрібнювались до 1 мм. Для отримання більш детальної характеристики фазового складу магнетиту з проби вихідної руди було відібрано магнітну фракцію.

Результати термогравіметричних досліджень магнетиту з вихідної руди і продуктів збагачення на РЗФ № 1 наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Характеристики фазового стану магнетиту за даними термогравіметричного аналізу

Характеристика речовини	Окиснення магнетиту, °C	Поліморфне перетворення магеміту, °C	Втрата маси після охолодження, %
Вихідна руда	250–300	520	0,74
Вихідна руда, магнетит	230–240	620–630	2,89
Промпродукт 1 стадії	280–350	560	0,12
Концентрат	250–360	440	2,7
Хвости 1 стадії	250–270	480	6,1
Хвости 3 стадії	270	650–660	4,02

За результатами термогравіметричних досліджень, (1) у магнетиті з продуктів збагачення, а саме у магнетиті як з концентрату, так і в магнетиті з хвостів, порівняно з магнетитом вихідної породи підвищується температура фазового переходу магнетит-магеміт (окиснення магнетиту) на 20–30 °C; (2) у магнетитовому концентраті порівняно з магнетитом вихідної породи знижується температура поліморфного перетворення магеміту на 40–60 °C; (3) у магнетиті з хвостів порівняно з магнетитом вихідної породи спостерігається незначне (близько 20 °C) підвищення температури поліморфного перетворення магеміту; (4) втрата маси в пробі з хвостів третьої стадії збагачення відносно вихідної породи після охолодження збільшується в п'ять разів.

Зафіксовані зміни термічних характеристик – температури фазового переходу магнетит-магеміт, температури

поліморфного перетворення магеміту, є індикаторами змін фізико-хімічного і кристалохімічного стану магнетиту в процесі збагачення вихідної руди. Ці зміни можна пояснити зменшенням розмірів кристалів магнетиту, їхньою деформацією, появою нової високодисперсної фази магнетиту зі збільшенням його питомої поверхні і відповідно поверхневої енергії, окисненням поверхневого шару частинок. Значне збільшення втрати маси в пробі з хвостів третьої стадії збагачення відносно вихідної породи може бути пояснене високою дисперсністю мінеральних фаз хвостів і їх насиченістю адсорбованою водою.

Рентгенодифракційний аналіз магнетиту було проведено на дифрактометрі ДРОН-UM1, фільтроване Co K_α випромінювання.

Для дослідження змін у фазовому складі і параметрах кристалічної ґратки магнетиту в процесі збагачення

на рентгенодифракційний аналіз було спрямовано зразки магнетиту з вихідної руди – залізистих кварцитів магнетитових, а також магнетитові концентрати після збагачення руди на РЗФ № 1, РЗФ № 2, і після проведення лабораторного експерименту збагачення в рудо-випробувальній лабораторії (РВЛ) АМКР.

Зразки вихідної руди вручну подрібнювались до 3 мм, матеріал розділявся на ситах, для аналізу відбиралась магнітна фракція розміром $-0,1+0,071$ мм. Магнетитові концентрати спрямовувались на аналіз без обробки.

Інтерпретацію результатів зйомки дифрактограм наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати рентгенофазового аналізу магнетиту вихідної руди (залізисті кварцити магнетитові) і магнетитових концентратів після збагачення на РЗФ № 1, РЗФ № 2 і в РВЛ АМКР

Місце відбору проби	Характеристика проби	Параметр елементарної комірки a , нм	ОКР, нм	Додаткові мінеральні фази
РЗФ1	Вихідна руда	8,399	30,55	Гетит-гематит
РЗФ1	Промпродукт 1 стадії	8,398	28,0	Кварц, гетит-гематит
РЗФ1	Концентрат	8,393	27,0	Кварц-
РЗФ2	Вихідна руда	8,397	32,4	Кварц, гематит
РЗФ2	Промпродукт 1 стадії	8,394	30,9	Кварц, гематит
РЗФ2	Концентрат	8,402	30,9	Кварц, гематит
Новокриворізьке родовище	Вихідна руда	8,404	32,5	Кварц, гематит
РВЛ АМКР	Концентрат	8,400	27,0	Кварц
Валявкинське родовище	Вихідна руда	8,403	29,3	Кварц, гематит
РВЛ АМКР	Концентрат	8,400	26,6	Кварц, гематит

За результатами рентгенодифракційного аналізу параметр елементарної комірки магнетитів лежить у межах 8,393–8,404 нм, додаткові мінеральні фази в пробах представлені кварцом, гетитом, гематитом.

Дослідження особливостей тонкої кристалічної структури магнетитів свідчить про певне закономірне зменшення розміру областей когерентного розсіювання (ОКР) магнетиту концентрату порівняно з магнетитом вихідної руди (рис. 9а, б).

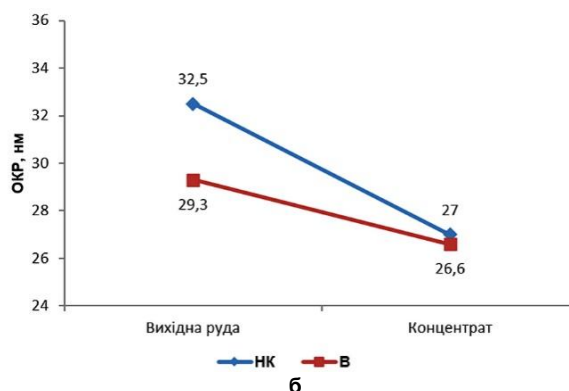
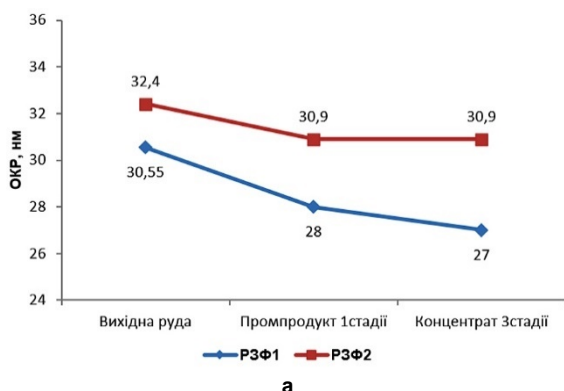


Рис. 9. Зміна розмірів областей когерентного розсіювання (ОКР) кристалів магнетиту під час збагачення вихідної руди – залізистих магнетитових кварцитів:

а – РЗФ № 1, РЗФ № 2; б – РВЛ АМКР (НК – руда Новокриворізького родовища, В – руда Валявкинського родовища)

Розширення ліній на дифрактограмах, по яких розраховуються розміри ОКР, зумовлене не лише дисперсністю областей когерентного розсіювання, а також мікродеформаціями кристалічної структури мінералу. Зафіксовані зміни фізичних властивостей магнетиту, а саме закономірне зменшення розмірів областей когерентного розсіювання свідчать, що під час проведення операцій збагачення вихідної руди на РЗФ, під дією зовнішніх напруг відбуваються незворотні (пластичні) зміни в тонкій будові кристалічної ґратки кристалів магнетиту.

Питому намагніченість насичення вихідних, проміжних та кінцевих продуктів збагачення корисної копалини (залізистих магнетитових кварцитів) досліджували на приладі для експресного вимірювання намагніченості руд і магнітних матеріалів, сконструйованому й виготовленому в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення НАН України (Патент UA 94163 U).

Як видно з табл. 4, значення намагніченості проб однакових стадій збагачення добре збігаються у разі

збагачувального процесу на РЗФ і технологічного експерименту із збагачення в РВЛ АМКР.

У процесі збагачення намагніченість промпродуктів поступово збільшується, і в кінцевому магнетитовому концентраті ($84\text{--}87 \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$) удвічі перевищує питому намагніченість вихідної руди. Вочевидь, це пов'язане з підвищенням концентрації магнетиту в пробах. Мінімальне значення питомої намагніченості зафіксовано у хвостах I стадії магнітної сепарації на РЗФ – $0,81\text{--}0,87 \text{ А}\cdot\text{м}^2/\text{кг}$, що в 50 разів менше намагніченості вихідної руди. У хвостах III стадії намагніченість так само на дуже низькому рівні, але перевищує намагніченість хвостів I стадії у 3–4 рази. Характер намагніченості хвостів, вірогідно, також зумовлений розподілом вмісту магнітних мінералів, насамперед магнетиту.

Для дослідження можливих змін магнітних властивостей магнетиту під час подрібнення його зерен у процесі збагачення руди на РЗФ, зразки магнітного продукту I стадії збагачення на РЗФ № 1 були вручну розтерті

в агатовій ступці до розміру <0,071 мм. Експеримент проведено на п'яти пробах.

Результати вимірювання питомої намагніченості проб до і після сухого перетирання в агатовій ступці

свідчать, що питома намагніченість насичення після тонкого подрібнення в агатовій ступці статистично достовірно зменшена на 5 % щодо вихідної проби (табл. 5).

Таблиця 4

Результати вимірювань питомої намагніченості насичення вихідних руд Новокириворізького і Валявкинського родовищ і продуктів їх збагачення на РЗФ і в РВЛ ПАТ АМКР

Місце відбору проб	Питома намагніченість насичення, А·м ² /кг				
	Вихідна руда	Магнітний продукт 1 стадії	Магнетитовий концентрат	Хвости 1 стадії	Хвости 3 стадії
РЗФ № 11, N=3	41,39	56,92	84,17	0,81	3,63
РЗФ № 2, N=3	40,83	50,81	87,16	0,87	2,48
Новокіриворізьке родовище, РВЛ	40,74	–	88,33	–	1,05
Валявкинське родовище, РВЛ	45,42	–	84,22	–	1,61

Примітка: n – кількість проб.

Таблиця 5

Результати вимірювань питомої намагніченості насичення магнітного продукту 1 стадії РЗФ № 1 до і після експериментального сухого подрібнення/перетирання в агатовій ступці

Проба	Питома намагніченість насичення, номери замірів, А·м ² /кг						
	1	2	3	4	5	Середнє	Ст. відхил.
Вихідний магнітний продукт	56,28	56,16	56,41	56,36	57,55	56,55	0,56
Магнітний продукт після подрібнення	53,26	53,57	53,75	53,09	54,0	53,53	0,36

Враховуючи той факт, що магнітний продукт складений переважно магнетитом, можна вважати, що зменшення намагніченості проби після її тонкого подрібнення пов'язане з дезінтеграцією агрегатів кристалів магнетиту і зменшенням розмірів його зерен. Цілком вірогідно, що такий самий процес зменшення намагніченості магнетиту під час тонкого подрібнення корисної копалини – залізистого кварциту відбувається і в умовах рудозбагачувальної фабрики.

Дискусія і висновки

Узагальнюючи результати лабораторно-аналітичних досліджень проб, відібраних на всіх технологічних етапах видобутку і збагачення корисної копалини – залізної руди – залізистих кварцитів магнетитових на ГЗК ПАТ "АМКР", починаючи із зразків вихідної руди, що природно залягає в кар'єрах Новокириворізького і Валявкинського родовищ, і закінчуючи готовою продукцією гірничого виробництва – концентратом залізородним агломераційним магнетитовим, зроблено такі висновки.

1. На першому етапі гірничого виробництва ПАТ "АМКР" (буровибухові роботи, дроблення руди в кар'єрах і на дробильних фабриках) істотних змін корисної копалини не відбувається. Залізна руда – магнетитові кварцити повністю зберігають свої характеристики: текстуру, структуру, мінеральний і хімічний склад. У результаті дроблення змінюється лише розмір фрагментів руди від непорушеного масиву породи в стінці кар'єру до уламків класу мінус 20 мм на виході з дробильних фабрик.

2. На етапі глибокої переробки та збагачення корисної копалини на РЗФ, у ході яких руда проходить три стадії подрібнення, класифікації, дешламації, мокрої магнітної сепарації, утворюються два абсолютно нових продукти – магнетитовий концентрат та хвости, які докорінно відрізняються від вихідної руди як на породному, так і на мінеральному рівні. Істотно змінюються структурно-текстурні характеристики, мінеральний, хімічний склад, агрегатний стан руди, структурні та кристалохімічні властивості основного рудного мінералу – магнетиту.

Структурно-текстурні характеристики. За даними мінералого-петрографічних досліджень, у процесі збагачення на РЗФ вихідна корисна копалина (магнетитові кварцити) зазнає суттєвих змін:

- міцна масивна порода перетворюється на пухкі тонкозернисті порошки;

- докорінно змінюється мінеральний склад внаслідок розділення речовини вихідної руди на майже чистий магнетит у кінцевому магнітному концентраті і суміш мінералів порожньої породи у хвостах;

- у результаті тонкого подрібнення повністю руйнується первинна шарувата текстура породи;

- відокремлення (розкриття) зерен мінералів зумовлює зникнення первинних структур вихідної породи (гранобластової, зросткової, пойкилітової тощо);

- у більшості випадків порушується первинна форма зерен рудних та нерудних мінералів з перетворенням їх на ксеноморфні гострокутні уламки.

Агрегатний стан. Суттєве збільшення питомої поверхні, характер кінетики седиментації, зростання насиченості адсорбованою водою, результати електронно-мікроскопічних досліджень гранулометричного складу продуктів переробки свідчать про зміну агрегатного стану внаслідок виникнення високодисперсних (колоїдних) мінеральних фаз у процесі збагачення. Причому диспергуванню з появою нової дисперсної фази піддається як магнетит у кінцевому концентраті, так і силікатна складова вихідної руди у хвостах.

Зміни хімічного складу. Результатом переробки руди на РЗФ є поділ вихідної речовини залізної руди на мінеральному рівні на збагачений магнетитом концентрат і хвости, що переважно складаються із силікатних мінералів. Відповідно змінюється й елементний склад продуктів переробки щодо хімічного складу вихідної руди. Вміст заліза в концентраті збільшується з 32,1–36,3 до 65,0–65,5 %, у два рази збільшується вміст Ge, у 1,5 рази Ni, також збільшується вміст Ti. Навпаки, у хвостах накопичуються елементи, які практично відсутні у концентраті, зокрема: Si, Al, Ca, Mg, K, P, Mn, Zr, Y, Yb, Sc, Be, Ga, Li.

Структурні і кристалохімічні перетворення магнетиту. За даними рентгенодифракційного аналізу, розширення ліній на дифрактограмах, яке пов'язане із зменшенням розмірів областей когерентного розсіювання і збільшенням мікронапружень кристалічної ґратки, свідчить, що під час проведення операцій збагачення під дією зовнішніх напруг відбуваються незворотні (пластичні) зміни в тонкій будові кристалічної ґратки кристалів магнетиту.

За результатами мікрозондових досліджень рудних мінералів встановлено, що в залізних рудах Валявкінського і Новокриворізького родовищ виділення магнетиту не є однорідними, вірогідно вони являють собою тонку суміш кристалічних фаз магнетиту, магеміту, гематиту, можливо вюститу (Михайлов та ін., 2022). Збільшення концентрації заліза в зернах магнетиту після переробки свідчить, що в процесі збагачення відбувається руйнування первинної кластерної структури зерен рудного мінералу з накопиченням в концентраті його магнетитової складової.

За результатами термогравіметричних досліджень – у магнетиті з продуктів збагачення порівняно з магнетитом вихідної породи підвищується температура фазового переходу магнетит-магеміт (окиснення магнетиту) і знижується температура поліморфного перетворення магеміту. Це відображає певні зміни фізико-хімічного і кристалохімічного стану магнетиту в процесі збагачення руди.

Зменшення намагніченості магнетиту свідчить про перебудову первинної доменної структури мінералу внаслідок дезінтеграції агрегатів кристалів магнетиту і зменшення розмірів його зерен під час тонкого подрібнення.

З'ясування всіх аспектів перетворення корисної копалини під час збагачення, в тому числі розкриття деталей механізму очищення кристалів магнетиту від домішок у процесі глибокої переробки руди на РЗФ, потребує додаткових спеціалізованих досліджень.

Внесок авторів: Вікторія Губіна – концептуалізація, методологія; Валентин Верховцев – адміністрування, написання (перегляд і редагування); Віктор Яценко – методологія, формальний аналіз; Володимир Покалюк – аналіз теоретичних засад досліджень, формалізація; Лариса Заборовська – методологія, збір емпіричних даних та їх валідація; Олена Лавриненко – методологія, збір емпіричних даних та їх валідація, Юрій Литвиненко – методологія, збір емпіричних даних та їх валідація.

Подяки, джерела фінансування. Автори висловлюють щире подяку керівництву та співробітникам ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг", які сприяли відбору проб і проведенню досліджень.

Viktoriia HUBINA¹, PhD (Geol. & Mineral.), Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7486-5451
e-mail: gvg131619@gmail.com

Valentyn VERKHVOTSEV¹, DSc (Geol.), Chief department
ORCID ID: 0000-0002-1015-6725
e-mail: verkhvotsev@ukr.net

Viktor YATSENKO¹, PhD (Geol. & Mineral.), Chief laboratory
ORCID ID: 0000-0002-8113-5702
e-mail: vgyatsenko@gmail.com

Volodymyr POKALYUK¹, DSc (Geol.), Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7848-5528
e-mail: pvskan@ukr.net

Larysa ZABOROVSKA¹, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7848-5528
e-mail: zaborovskayalp63@gmail.com

Olena LAVRYNENKO¹, DSc (Chem.), Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9256-1221
e-mail: alena.lavrynenko@gmail.com

Yuriy LYTVYVENKO¹, Junior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6609-0000
e-mail: Lisick8@gmail.com

¹State Institution "The Institute of Environmental Geochemistry of National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

Список використаних джерел

- Белевцев, Я. Н. (Ред.) (1989). Залізисто-кременисті формації докембрію європейської частини СРСР. Мінералогія. Наукова думка.
Губіна, В. Г., & Кадошніков, В. М. (2004). Фізико-хімічні перетворення відходів збагачення залізистих кварцитів. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навоколишнього середовища. Геохімія та екологія*, 10, 78–81.
Михайлов, В., Шнюков, С., Коструба, А., Харитонова, Т., Григорєва, Х., & Ткалич, М. (2022). Правові аспекти переробки залізних руд Криворізького залізничного басейну. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(96), 64–75. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.10>
Светкина, Е. Ю. (2013). Інтенсифікація процесу збагачення при віброударній активації мінералів. *Науковий вісник НГУ*, 2, 38–43.
Швец, И. Н. (1962). Зависимость магнитных свойств порошкообразного магнетита от крупности зерна. *Записки украинского отдела Всесоюзного минералогического общества АН УССР*, 140–145.
Musa, F., & Morrison, R. (2009). A more sustainable approach to assessing comminution efficiency. *Miner. Eng.*, 22, 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.004>
Si, L., Cao, Y., & Fan, G. (2021). The Effect of Grinding Media on Mineral Breakage Properties of Magnetite. *Ores. Geofluids*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/1575886>

References

- Belevtsev, Ya. N. (Ed.) (1989). Mud-siliceous formations of the Precambrian of the SRSR European part. *Mineralogy. Naukova dumka* [in Russian].
Hubina, V. H., & Kadoshnikov, V. M. (2004) Physico-chemical transformations of the enrichment of silty quartzites. *Collection of Sciences of the Institute of Environmental Geochemistry. Geochemistry and ecology*, 10, 78–81 [in Ukrainian].
Musa, F., & Morrison, R. (2009) A more sustainable approach to assessing comminution efficiency. *Miner. Eng.*, 22, 593–601. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.004>
Mykhaylov, V., Shnyukov, S., Kostuba, O., Kharytonova, T., Hryhoryeva, Kh., & Tkalych, M. (2022) Legal aspects of salvage ores processing in the Krivoriizka salvage ore basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(96), 64–75. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.10> [in Ukrainian].
Shvets, I. N. (1962) Deposit of magnetic powers of powdered magnetite depending on grain size. *Notes of the Ukrainian branch of the All-Union Mineralogical Partnership of the Academy of Sciences of the USSR*, 140–145 [in Russian].
Si, L., Cao, Y., & Fan, G. (2021) The Effect of Grinding Media on Mineral Breakage Properties of Magnetite Ores. *Geofluids*, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2021/1575886>
Svetkina, Ye. YU. (2013) Intensification of the enrichment process with vibration-impact activation of minerals. *Naukovyi visnik NGU*, 2, 38–43 [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 04.05.23

Прорецензовано / Revised: 20.07.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

MINERAL AND PHYSICAL AND CHEMICAL CHANGES IN MAGNETITE QUARTZITES OF THE VALYAVKINSKY AND NOVOKRIVORIZKY DEPOSITS OF THE KRYVBUS DURING THEIR MINERAL PROCESSING

Background. In order to study the mineral physical and chemical changes that occur with iron ore (magnetite quartzites) of the Valyavkinsky and Novokrivorizky deposits of the Kryvorizka iron ore basin during the mining and processing of ore at the mining and processing plant "ArcelorMittal Kryvyi Rih", the entire technological chain of mining and mineral processing was analyzed: magnetite quartzite (ore) in natural

deposits → ore after explosion → ore after crushing at crushing plants → intermediate magnetic products and tailings of all stages of beneficiation → final magnetite concentrate.

M e t h o d s . *Laboratory and analytical studies, which include mineragraphic, petrographic, electron microscopic studies of iron ore, X-ray fluorescence method and atomic emission spectral analysis (determination of the content of macro- and microelements in the original ore, magnetic concentrate and tailings), X-ray diffraction analysis, microprobe analysis of magnetic concentrate and tailings, thermogravimetric analysis, chromatographic method (determination of the specific surface of a substance), sedimentation analysis, measurement of magnetic characteristics, etc. were used.*

R e s u l t s . *It was established that at the first stage of mining production (drilling and blasting, ore crushing in the quarry and at the crushing plant) there are no significant changes in minerals. At the next stage of deep processing and concentration of minerals at the ore beneficiation plant, during which the ore undergoes 3 stages of crushing, classification, desliming, and wet magnetic separation, two completely new products are formed – magnetite concentrate and tailings, which are fundamentally different from the original ore – both at the rock level and at the mineral one.*

C o n c l u s i o n s . *It was substantiated that in the process of enrichment of magnetite quartzites, the structural and textural characteristics, mineral and chemical composition, state of aggregation of the iron ore, structural and crystallochemical properties of the main ore mineral magnetite change significantly.*

K e y w o r d s : *Krivi Rih iron ore basin, magnetite quartzite, mineral processing, magnetite, technical mineralogy.*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

УДК 549.08+550.4.02+54.027

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.06>

Олександр ПУШКАРЬОВ¹, д-р геол. наук, ст. наук. співроб., провід. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-4382-8620
e-mail: pushkarevigns@gmail.com

Ірина СЕВРУК¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0003-2407-0735
e-mail: Irina_mihalovna@ukr.net

Олександр ЗУБКО¹, наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-2521-8087
e-mail: g200709g@yahoo.com

Віталій ДОЛІН¹, інж.
ORCID ID: 0000-0002-1962-9277
e-mail: dolinvitaliy@gmail.com

Юрій ДЕМИХОВ¹, канд. геол.-мінерал. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3576-6570
e-mail: IGNS_Demikhov@nas.gov.ua

Вадим СКРИПКИН¹, наук. співроб.
e-mail: IGNS_Skrypkin@igns.gov.ua

¹ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України", Київ, Україна

ВЗАЄМОДІЯ Н(D,T)О З МІНЕРАЛЬНИМИ АДсорбЕНТАМИ У СТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМАХ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)

Вступ. Теоретичною базою експериментів є уявлення, що значні адсорбційні властивості шаруватих силікатів монтморилонітової і палигорськітової груп та кліноптилоліту з розвинутою питомою поверхнею внаслідок динамічного характеру адсорбційно-десорбційних процесів за рахунок кінетичних ізотопних ефектів можуть забезпечити пріоритетне утримання біля адсорбційних поверхонь мінеральних частинок більш інерційних гідроксидних груп ОН⁻.

Методи. Для експериментів було використано: черкаський бентоніт із вмістом монтморилоніту 75 % (далі монтморилоніт), варварівський сапоніт та сокирницький кліноптилоліт. Експерименти виконувалися у стаціонарному режимі в герметично закритих ємностях (двофазна водно-мінеральна система).

Результати. За перші 7 діб взаємодії водної і мінеральної фаз питома активність тритію в робочому розчині зменшилася на 31,8–69,5 %. У подальшому протягом 92 діб взаємодії водного розчину Н(D,T)О з мінеральними адсорбентами зміна питомої активності тритію не перевищувала 2–4%. Одночасно протягом цього часу вихідна концентрація дейтерію у робочому розчині Н(D,T)О двофазних водно-мінеральних систем зменшилася лише на 0,8–14 % з коливанням від 0,0066 до 0,0408 %. За час експерименту у закритих водно-мінеральних системах відбувся частковий міжфазовий перерозподіл вихідного запасу ізотопів водню, який налічувався в початковому робочому розчині Н(D,T)О. У процесі адсорбційного поглинання розчину мінеральними адсорбентами відбулося заміщення вихідної вологи в мінеральній фазі на Н(D,T)О та збільшення в них вмісту ізотопів водню. Вміст тритію в адсорбаті залежно від мінерального типу адсорбенту збільшився на 31,8–69,5 %. Вміст дейтерію збільшився на 10,1–48,6 %, що було зумовлено різною адсорбційною ємністю мінеральних адсорбентів. Адсорбція робочого розчину Н(D,T)О мінеральними адсорбентами супроводжувалася фракціонуванням важких ізотопів водню.

Висновки. У результаті взаємодії розчину Н(D,T)О з мінеральними адсорбентами кінетичні ізотопні ефекти зумовили пріоритетне утримання більш інерційних гідроксидних ОН⁻ груп, ніж OD⁻ груп біля адсорбційної поверхні мінеральних частинок. Як наслідок – у стаціонарних водно-мінеральних системах відбулося міжфазове фракціонування важких ізотопів водню. Коефіцієнти міжфазового фракціонування тритію дорівнюють від $\alpha = 1,26$ для палигорськіту до $\alpha = 2,96$ для кліноптилоліту. Для дейтерію цей показник дорівнює від $\alpha = 0,89$ для кліноптилоліту до $\alpha = 1,10$ для сапоніту.

Ключові слова: фракціонування, тритій, дейтерій, монтморилоніт, сепіоліт, сапоніт, палигорськіт, кліноптилоліт.

Вступ

Розв'язання проблеми розділення важких ізотопів водню має важливе значення для очищення технологічних вод, на підприємствах паливно-енергетичного комплексу від утвореного в них тритію для повторного використання дейтерію на важководних реакторах. Існуючі способи вилучення важких ізотопів з води (CA1103614, RU 2201283, CA1085341, US5312597A, DE3001967A1, DE3122498A1, EP0198940A1, RU2531178, DE2900912A1 та ін.) є енергозатратними, та потребують великих матеріальних витрат. Разом з тим існують класи мінеральних адсорбентів, які можуть достатньо ефективно вилучати тритій із водних розчинів. Довготривалими експериментами нами була підтверджена можливість використання шаруватих силікатів монтморилонітової групи, стрічково-каналних силікатів палигорськітової групи та каркасних силікатів цеолітової групи як реагуючої речовини для вилучення тритію з водних розчинів (Lopez-Galindo et al., 2008; Пушкар'єв, & Приймаченко, 2010; Пушкар'єв, Приймаченко, & Золкін, 2012; Пушкар'єв та ін., 2014, Пушкар'єв, Руденко,

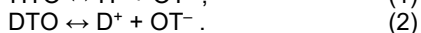
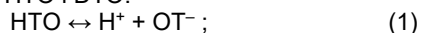
& Скрипкін, 2015, Пушкар'єв та ін., 2016; Руденко, 2017; Патенти 103033, 03050, 113348 UA).

Метою виконаних досліджень було експериментальне визначення можливості використання шаруватих силікатів монтморилонітової і палигорськітової груп та кліноптилоліту як адсорбційної субстанції для розділення важких ізотопів водню у водному розчині у водно-мінеральних стаціонарних системах.

Експериментальні дослідження щодо визначення можливості фракціонування важких ізотопів водню з використанням мінеральних сорбентів у стаціонарних двофазних системах базувалися на уявленнях про відмінності фізичних характеристик ізотопів водню (Audi et al., 2003). Теоретичною основою можливості розділення ізотопів водню з використанням мінеральних адсорбентів є пряма залежність енергії зв'язку в ізотопних водневих сполуках від маси ізотопу водню. В ізотопній молекулі тритійованої або дейтерієвої води (НТО, DTO) ковалентний зв'язок D—O і T—O міцніший за H—O, завдяки чому виникає можливість розділення ізотопів

© Пушкар'єв Олександр, Севрук Ірина, Зубко Олександр, Долін Віталій, Деміхов Юрій, Скрипкін Вадим, 2024

водню внаслідок кінетичних ізотопних ефектів більш важких ізотопних гідроксидів OT^- , OD^- , утворених у ході дисоціації молекул HTO і DTO :



Використані мінеральні адсорбенти були представлені шаруватими силікатами монтморилонітової і палигорськітової груп та кліноптилолітом. Мінерали цих груп характеризуються розвинутою питомою поверхнею мінеральних частинок, яка зумовлює їхні потужні адсорбційні властивості. (рис. 1).

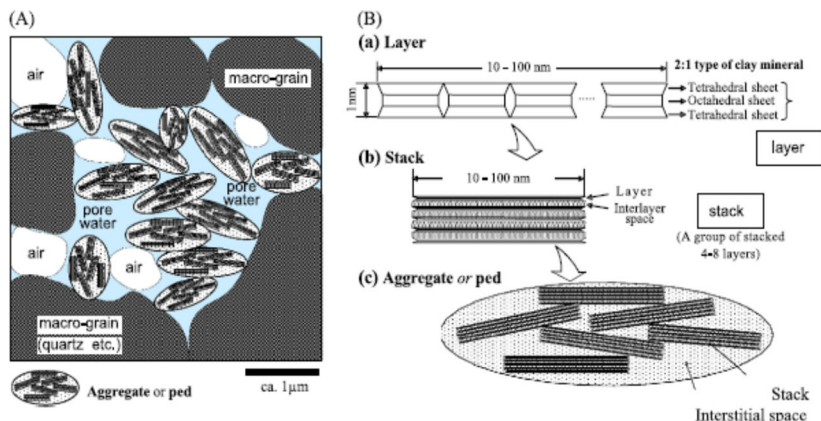


Рис. 1. Структура бентонітової глини:
(А) – мегаструктура; (В) – мікроструктура (Ichikawa, 2004)

Водночас інтенсивність і швидкість ізотопного обміну в системі "мінерал-водна фаза" визначаються досяжністю реакційних поверхонь мінеральних частинок для гідроксидів OD^- (OT^-), яка залежить від швидкості обміну на межі рідкої і мінеральної фаз та швидкості молекулярної дифузії у порах та адсорбційному шарі (Goldansky, & Trahtenberg, 1980; Hammes-Shiffer, 1998; Zakn, & Brickmann, 1999).

Базальні площини шаруватих силікатів (філосилікатів) є зазвичай нейтральними але внаслідок ізоморфних заміщень на них виникають від'ємні заряди, утворюючи електричні поля, які впливають у всіх напрямках на поверхневий обмінний потенціал і таким чином зумовлюють зростання катіонної адсорбції на базальних поверхнях. Цей потенціал разом із електричним потенціалом, що генерується протонним обміном, суттєво впливає на адсорбційну здатність крайових поверхонь мінеральних частинок.

Процес молекулярної адсорбції супроводжується формуванням на міжфазовій межі "вода – мінеральна частка" граничного адсорбційного шару. У його межах зазвичай розвивається подвійний електричний шар (ПЕШ), який має характер електричного конденсатора. Порушення електронейтральності адсорбуючих поверхонь веде до розвитку в ПЕШ електрокінетичних явищ, поляризації та притягнення наближених до мінеральної частки молекул води.

Найважливішою особливістю сорбційних процесів є їх динамічний характер. Кожна адсорбована частка (молекула) має різну міцність зв'язків з поверхнею, яка

визначається часом затримки частки на адсорбуючій поверхні, тобто часом адсорбції T . Для фізичної адсорбції, зумовленої слабкими компонентами поверхневої енергії, цей час дуже малий і становить до 10^{-13} с. Отже, величина адсорбції, тобто затримки частинки поверхнею, є кінетичним фактором, який і визначає співвідношення адсорбованих і десорбованих молекул. Таким чином, динамічний характер адсорбційно-десорбційних процесів дає змогу очікувати на прояв кінетичних ізотопних ефектів з пріоритетним утриманням більш інерційних гідроксидних груп із важкими ізотопами водню OD^- чи OT^- біля адсорбційної поверхні мінеральних частинок.

Методи

Для підготовки адсорбентів у двофазних водно-мінеральних експериментальних системах було використано: монтморилонітова (далі монтморилоніт) глина Черкаського родовища (Україна) із вмістом монтморилоніту 75 %, сапоніт Варварівського родовища (Україна), палигорськіт Черкаського родовища, сепіоліт з родовища Вікалваро (Іспанія), а також каркасний силікат кліноптилоліт Сокирницького родовища (Україна). Мінеральні адсорбенти було переведено у Na-форму. Для цього мінеральну субстанцію витримували протягом трьох діб у 1N розчині NaCl , після чого її декантували, промивали і відмучували дистильованою водою для видалення залишків сольового розчину та дрібноуламкових домішок інертних мінералів.

Експерименти виконувалися у стаціонарному режимі в герметично закритих ємностях. Склад експериментальних систем наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Склад двофазних експериментальних систем			
Адсорбент	Індекс системи	Маса адсорбенту, г	Об'єм H(D,T)O , cm^3
Монтморилоніт	D-3	110,0	500,0
Сапоніт	D-4	110,0	500,0
Палигорськіт	D-5	110,0	500,0
Сепіоліт	D-6	110,0	500,0
Кліноптилоліт	D-7	110,0	517,0

Водна фаза експериментальних систем була представлена тритій-дейтерієвим розчином із вмістом дейтерію 0,495 % і питомою активністю тритію $6678 \text{ Бк} \cdot \text{дм}^{-3}$. Із

водної фази через кожні 7 діб відбиралися проби рідини об'ємом 12 мл для визначення вмісту дейтерію і тритію. Загальна тривалість експерименту становила 92 доби.

Вміст дейтерію у відібраних пробах було визначено у лабораторії ізотопної геохімії ДУ "ІГНС НАН України" під керівництвом завідувача лабораторії Ю.М. Деміхова на мас-спектрометрі MI 1201 СГ, відповідно до прийнятої методики. Згідно з протоколом визначення складу стабільних ізотопів водню у воді ТУ 1213-17-51188Е, абсолютний вміст дейтерію у вихідному розчині $H(D,T)O$ після трьох повторних вимірів становив у середньому 0,495 %.

Для виміру вмісту тритію відібрані проби водної фази очищали від органічних домішок шляхом додавання до розчину 10–30 мг твердого $K_2Cr_2O_7$. Після дистиляції проби змішувалися із сцинтилятором Hi Safe 3 Wallac у співвідношенні 8:12. Вміст тритію в підготовлених таким чином емульсіях визначався за допомогою рідинного сцинтиляційного β -спектрометра Quantulus 1220 (LKW Wallac) з похибкою виміру не більш як ± 5 %.

Результати

Поверхнево адсорбована вода у глинистих мінералах є слабкозв'язаною, її молекули утримуються на поверхні мінеральних частинок за рахунок сил міжмолекулярної взаємодії з поверхневими атомами мінеральних частинок. Ця, енергетично слабкозв'язана вода видаляється з глинистих мінералів за даними диференціального термічного аналізу (ДТА) за температури до 110 °С.

Дані щодо втрати вологи з повітряно-сухих мінеральних наслідок їхнього прогріву за температури до 110 °С наведено в табл. 1. У мінералах зі структурним типом 2:1 ємність поверхнево адсорбованої вологи є найбільшою (13,12 % у монтморилоніті та 12,57 % у сапоніті).

Завдяки цьому такі мінерали мають найбільший потенціал для ізотопно-водневого обміну. Аналогічний ефект спостерігається також у мінералах із стрічково-канальною структурою – у палигорськіті та сепіоліті, де кількість поверхнево адсорбованої води в мінеральній масі становить близько 10,5 % (Пушкарьов, Руденко, & Скрипкін, 2015).

Наявність поверхнево адсорбованої вологи навіть у повітряно-сухій мінеральній масі вносить деякі корективи в процес ізотопно-водневого обміну у водно-мінеральній системі. На початковій стадії такого процесу вихідна поверхнево адсорбована вода зумовлює деяке зменшення концентрації важких ізотопів у водній фазі внаслідок її розведення відповідно до виразу (3):

$$d = W_0 / (V_s + W_0), \quad (3)$$

де d – показник ступеня розведення вихідного робочого розчину $H(D,T)O$ у закритій системі "мінерал – $H(D,T)O$ "; W_0 – початковий об'єм робочого розчину $H(D,T)O$ у закритій водно-мінеральній системі, мл; V_s – об'єм поверхнево адсорбованої води у мінеральній масі, мл.

На основі отриманих результатів вимірів вмісту тритію (Бк/дм³) і дейтерію (г/100 мл) розраховано вміст та концентрації ізотопів у відібраних пробах і залишку декантату експериментальних систем та оцінено їх флуктуації за час виконання експерименту.

На початковій стадії взаємодії повітряно-сухих мінеральних адсорбентів із $H(D,T)O$ відбулося поглинання деякої частини робочого розчину (табл. 3).

Таблиця 2

Ступінь можливого розведення вихідного робочого розчину $H(D,T)O$ у системах з мінеральними адсорбентами

Ступінь розбавлення вихідної $H(D,T)O$	Глинисті мінерали			
	Монтморилоніт	Сапоніт	Палигорськіт	Сепіоліт
	0,968	0,982	0,974	0,988

Таблиця 3

Результати взаємодії мінеральних адсорбентів із робочим розчином $H(D,T)O$

Адсорбент	Індекс системи	Загальний об'єм декантату, см ³	Маса адсорбенту після експерименту, г	Об'єм адсорбату, см ³
Монтморилоніт	D-3	428,65	181,35	71,35
Сапоніт	D-4	287,9	322,1	212,1
Палигорськіт	D-5	259,95	350,05	240,05
Сепіоліт	D-6	307,1	302,9	192,9
Кліноптилоліт	D-7	460,25	166,9	56,9

Вже за перші 7 діб взаємодії водної і мінеральної фаз питома активність тритію в робочому розчині зменшилася (табл. 4) до 5316 Бк/дм³ у системі з монтморилонітом (D 3) і до 3651 Бк/дм³ у системі із сапонітом (система D 4).

У подальшому протягом всього часу експерименту відбувалися незначні середні відхилення від середніх значень питомих активностей тритію (від ± 109 Бк/дм³ у бентоніті (система D 3) і до ± 662 Бк/дм³ у сапоніті (система D 4). При цьому концентрація дейтерію за час експерименту майже не змінювалася (табл. 5), з коливаннями в експериментальних системах від $\pm 0,0066$ % (система D 7, кліноптилоліт) до $\pm 0,0408$ % (система D 4, сапоніт).

Після заміщення в мінеральній масі вихідної порової та адсорбованої вологи розчином $H(D,T)O$ почалося вилучення важких ізотопів водню мінеральним адсорбентом. Для кількісної оцінки ефективності цього процесу використано такий параметр, як запас важкого ізотопу водню у залишку робочого розчину $H(D,T)O$ (декантаті) та в адсорбаті мінеральної маси, який обчислювався згідно з виразом (4):

$$Q = A/1000 \cdot V, \quad (4)$$

де Q – запас тритію в об'ємі, що визначають, Бк; A – питома активність тритію у водній фазі, Бк/дм³; V – об'єм водної фази, см³.

В умовах закритих експериментальних систем запас тритію в адсорбаті мінеральної фази обчислювався як різниця запасу ізотопу в робочому розчині $H(D,T)O$ відповідно до і після її взаємодії з мінеральною масою (5):

$$Q_m = Q_w - Q_f, \quad (5)$$

де Q_m – запас ізотопу в адсорбаті мінеральної фази експериментальної системи, Бк; Q_w – початковий запас ізотопу у використаному обсязі вихідної $H(D,T)O$, Бк; Q_f – запас ізотопу у водній фазі $H(D,T)O$, після її взаємодії з мінеральною масою по завершенню експерименту, Бк.

За час експерименту у закритих водно-мінеральних системах відбувся частковий міжфазовий перерозподіл початкового запасу ізотопів водню, який налічувався у вихідному робочому розчині $H(D,T)O$ (табл. 4, 5, рис. 2). У процесі адсорбційного поглинання розчину $H(D,T)O$ мінеральними адсорбентами відбулося заміщення вихідної вологи в мінеральній фазі та збільшення вмісту тритію і дейтерію в адсорбаті. Вміст тритію в адсорбаті збільшився від 31,8 % у монтморилоніті (D 3) до 69,5 % у сапоніті (D 4). Вміст дейтерію збільшився на 10,1–48,6 %, що було зумовлено різною адсорбційною ємністю мінеральних адсорбентів (табл. 3).

Таблиця 4

Результати виміру вмісту тритію в експериментальних системах за час експерименту

Адсорбент	Індекс системи	Питома активність Т в пробах і декантаті, Бк×дм ⁻³	Запас тритію в декантаті		% від вмісту Т (N атом) у вихідній Н(Д,Т)О	Запас тритію в адсорбаті		% від вмісту Т (N атом) у вихідній Н(Д,Т)О
			Qf, Бк	N атом		Qm, Бк	N атом	
Монтморилоніт	D-3	5316±109,4	2279	1,3Е+12	68,2	1060,3	6,0Е+11	31,8
Сапоніт	D-4	3651±662,3	1020	5,4Е+11	30,5	2319,6	1,3Е+12	69,5
Палигорськіт	D-5	5032±180,9	1318	7,4Е+11	39,5	2021,4	1,1Е+12	60,5
Сепіоліт	D-6	5139±199,3	1603	9,0Е+11	48,0	1687,1	2,8Е+10	52,0
Кліноптилоліт	D-7	5195±368,7	2331	1,3Е+12	67,5	1123,0	6,3Е+11	32,5

Таблиця 5

Результати виміру вмісту дейтерію в експериментальних системах за час експерименту

Адсорбент	Індекс системи	Концентрація D в пробах і декантаті, % (г/100 см ³)	Запас D в декантаті		Запас D в адсорбаті	
			Qf, г	% від вмісту D (N г) у вихідній Н(Д,Т)О	Qm, г	% від вмісту D (N г) у вихідній Н(Д,Т)О
Монтморилоніт	D-3	0,496±0,0096	2,134	86,2	0,341	13,8
Сапоніт	D-4	0,423±0,0408	1,320	53,3	1,155	46,7
Палигорськіт	D-5	0,48±0,014	1,273	51,4	1,202	48,6
Сепіоліт	D-6	0,489±0,0144	1,516	61,3	0,959	38,7
Кліноптилоліт	D-7	0,491±0,0066	2,224	89,9	0,251	10,1

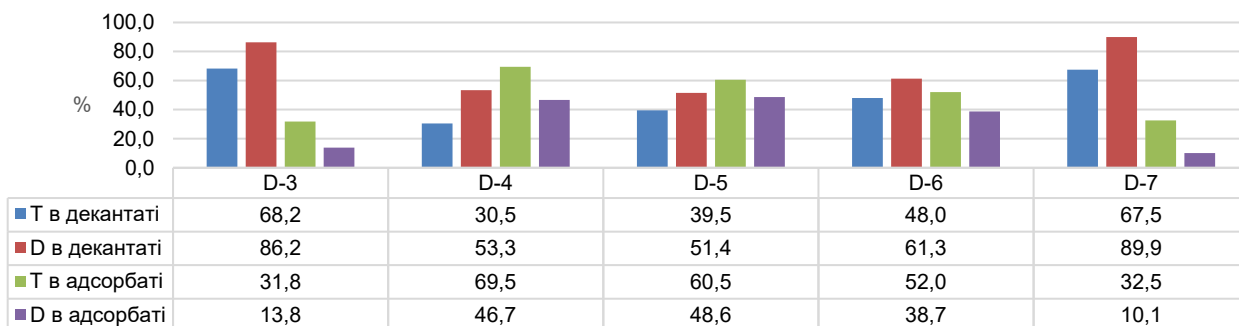


Рис. 2. Розподіл запасу дейтерію і тритію вихідної Н(Д,Т)О між декантатом і адсорбатом у закритих експериментальних системах

Одночасно, в процесі сорбції Н(Д,Т)О мінеральними адсорбентами було зафіксовано прояви фракціонування важких ізотопів водню. Для оцінки ефекту міжфазового фракціонування ізотопів водню з використанням виразу (6) (Evans, 1970) питомі активності тритію були перераховані на кількості атомів ізотопу ³H:

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{A}{0,693} \cdot T_{1/2} \quad (6)$$

де N – кількості атомів тритію, що відповідають питомій активності досліджуваної субстанції; A – питома активність тритію, Бк×дм⁻³; $\lambda = (0,693/T_{1/2})$ – константа розпаду тритію; $T_{1/2}$ – період напіврозпаду тритію, с.

Згідно з наведеним виразом кількість атомів тритію, що відповідає 1 Бк у досліджуваній рідкій субстанції, дорівнює 5,62Е+08. Для розрахунку питомої кількості атомів тритію в декантаті (адсорбаті) було використано вираз (7):

$$N_{Ti} = A_i \cdot 5,62Е + 08 \quad (7)$$

де N_{Ti} – питома кількість атомів тритію в декантаті (адсорбаті) експериментальної системи, атом×см⁻³; A_i – питома активність тритію, Бк×см⁻³.

Для розрахунку коефіцієнтів фракціонування ізотопів водню за взаємодії Н(Д,Т)О з мінеральним адсорбентом, відповідно використано вираз (8):

$$\alpha = \frac{T_m}{H_m} \cdot \frac{T_w}{H_w}, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт фракціонування ізотопів водню, T_m , H_m – концентрація атомів тритію і протію у декантаті, атом×см⁻³; T_w , H_w – концентрація атомів тритію і протію у вихідному

розчині Н(Д,Т)О, атом×см⁻³, після досягнення рівноважного стану в системі "мінеральний адсорбент – Н(Д,Т)О".

Застосування наведеного класичного виразу для розрахунку коефіцієнта фракціонування ізотопів водню вимагає деяких корективів. Це пов'язано з тим, що концентрації протію і тритію у водних фазах експериментальних систем розрізняються на 14 порядків. Дещо меншою мірою це стосується дейтерію, оскільки співвідношення $[D]/[H]$ у природній воді не перевищує $(1,32 \pm 1,51) \cdot 10^{-4}$. Водночас у процесі взаємодії робочого розчину Н(Д,Т)О і мінерального адсорбенту концентрація протію практично не змінюється і величини H_m і H_w залишаються на рівні $6,69 \cdot 10^{22}$ атомів Н×см⁻³.

Отже, для обчислення коефіцієнта фракціонування ізотопів водню в досліджуваних субстанціях досить взяти до уваги тільки концентрації тритію і дейтерію в експериментальних системах після встановлення рівноважного стану між водною та мінеральною фазами. З урахуванням викладеного, вираз (8) трансформовано у вирази (9, 10):

$$\alpha = D_m \cdot H_w^{-1}, \quad (9)$$

$$\alpha = T_m \cdot T_w^{-1}, \quad (10)$$

де α – коефіцієнт фракціонування ізотопів водню, D_m – концентрація дейтерію в адсорбаті, після досягнення рівноважного стану в системі "мінеральний адсорбент – Н(Д,Т)О", г×см⁻³; T_m – концентрація атомів тритію в адсорбаті, після досягнення рівноважного стану в системі "мінеральний адсорбент – Н(Д,Т)О", атом×см⁻³; D_w , – концентрація дейтерію у вихідному розчині Н(Д,Т)О, (0,00495 г×см⁻³); T_w – концентрація тритію у вихідному розчині Н(Д,Т)О, (3,75Е+09 атом×см⁻³).

Отримані результати експериментів із закритими двофазними водно-мінеральними системами підтвердили очікувану можливість фракціонування важких

ізоотопів водню внаслідок динамічних адсорбційно-десорбційних процесів (рис. 3, табл. 6, 7).

Таблиця 6

Зміна концентрації тритію в процесі адсорбції розчину Н(Д,Т)О мінеральними адсорбентами

Адсорбент	Індекс системи	Об'єм адсорбату, мл	Запас тритію в адсорбаті, Бк	Концентрація тритію в адсорбаті, атом $\times$ см ⁻³	Коефіцієнт міжфазового фракціонування тритію, α
Бентоніт	D-3	71,35	2278,70	8,35E+09	2,23
Сапоніт	D-4	212,1	2319,6	6,15E+09	1,64
Палигорськіт	D-5	240,1	2021,4	4,73E+09	1,26
Сепіоліт	D-6	192,9	1735,9	5,06E+09	1,35
Кліноптилоліт	D-7	56,9	1123,0	1,11E+10	2,96

Таблиця 7

Зміна концентрації дейтерію в процесі адсорбції розчину Н(Д,Т)О мінеральними адсорбентами

Адсорбент	Індекс системи	Об'єм адсорбату, мл	Запас дейтерію в адсорбаті, г	Концентрація дейтерію в адсорбаті, г $\times$ см ⁻³	Коефіцієнт міжфазового фракціонування дейтерію, α
Бентоніт	D-3	71,35	0,341	0,00479	0,97
Сапоніт	D-4	212,1	1,155	0,00545	1,10
Палигорськіт	D-5	240,1	1,202	0,00501	1,01
Сепіоліт	D-6	192,9	0,959	0,00497	1,00
Кліноптилоліт	D-7	56,9	0,251	0,00441	0,89

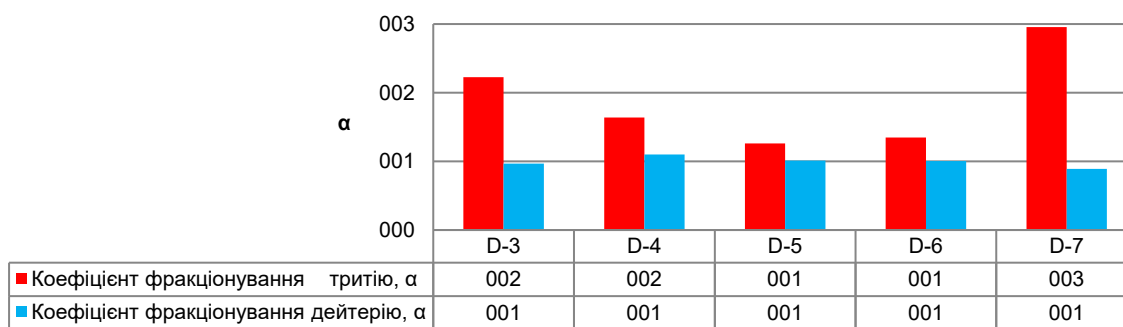


Рис. 3. Фракціонування важких ізоотопів водню у стаціонарних водно-мінеральних системах

У результаті взаємодії розчину Н(Д,Т)О з мінеральними адсорбентами кінетичні ізоотопні ефекти зумовили пріоритетне утримання більш інерційних гідроксидних ОТ⁻ груп, ніж ОД⁻ груп біля адсорбційної поверхні мінеральних частинок (рис. 3). Це призвело до фракціонування важких ізоотопів водню зі зміною концентрації тритію і дейтерію у залишковій частині Н(Д,Т)О (декантаті) та адсорбаті в мінеральній масі.

Дискусія і висновки

Визначена можливість міжфазового фракційного розділення важких ізоотопів водню у водно-мінеральних системах, які складаються з розчину Н(Д,Т)О та мінеральних адсорбентів, представлених шаруватими силікатами монтморилонітової і палигорськітової груп та кліноптилолітом.

Потужні адсорбційні властивості мінеральних частинок шаруватих силікатів монтморилонітової і палигорськітової груп та кліноптилоліту з розвинутою питомою поверхнею внаслідок динамічного характеру адсорбційно-десорбційних процесів за рахунок кінетичних ізоотопних ефектів зумовили пріоритетне утримання біля адсорбційних поверхонь мінеральних частинок більш інерційних гідроксидних груп ОТ⁻.

Як наслідок – у стаціонарних водно-мінеральних системах відбулося міжфазове фракціонування важких ізоотопів водню. Коефіцієнти міжфазового фракціонування тритію дорівнюють від $\alpha = 1,26$ для палигорськіту до $\alpha = 2,96$ для кліноптилоліту. Для дейтерію цей показник дорівнює від $\alpha = 0,89$ для кліноптилоліту до $\alpha = 1,10$ для сапоніту.

Внесок авторів: Олександр Пушкар'єв – концептуалізація, методологія, написання (оригінальна чернетка); Ірина Севрук – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування); Олександр Зубко – методологія, валідація даних; Віталій Долін – формальний аналіз; Юрій Деміхов – методологія, валідація даних; Вадим Скрипкін – методологія, валідація даних.

Список використаних джерел

- Пушкар'єв, О. В., Руденко, І. М., & Скрипкін, В. В. (2015). Адсорбція тритію з водних розчинів термічно обробленими глинистими мінералами. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 71, 43–48.
- Пушкар'єв, О. В., Руденко, І. М., Долін, В. В. (мол.), & Приймаченко, В. М. (2014). Сепіоліт-цеолітові композити як потенційні водопроникні реакційні бар'єри. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 23, 75–84.
- Пушкар'єв, О. В., Руденко, І. М., Кошелєв, М. В., Скрипкін, В. В., Долін, В. В. (мол.), & Приймаченко, В. М. (2016). Мінеральний адсорбент тритію на основі сапоніту та цеоліту. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 25, 3–48.
- Пушкар'єв, О. В., Приймаченко, В. М., & Золкін, І. О. (2012). Властивості бентоніт-цеолітових композитів щодо вилучення тритію з тритієвої води. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 20, 98–107.
- Пушкар'єв, О. В., & Приймаченко, В. М. (2010). Взаємодія тритієвої води з глинистими мінералами. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 18, 149–158.
- Руденко, І. М., Пушкар'єв, О. В., Долін, В. В., Зубко, О. В., & Гречановська, О. Є. (2017). Тритієвий індикатор ефективності термомодифікації адсорбційних властивостей кліноптилоліту. *Мінералогічний журнал*, 39(2), 64–74.
- Audi, G., Bersillon, O., Blachot, J., & Wapstra, A.H. (2003). The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics, A* 729, 3–128.
- Bleam, W. F. (1990). The nature of cation substitution sites in phyllosilicates. *Applied Clay Minerals*, 38, 527–536.
- Goldansky, V. I., & Trahtenberg, L. I. (1980). Tunneling phenomena in Chemical Physics. Gordon and Breach Science Publishers.

Hammes-Shiffer, S. (1998) Mixed quantum-classical dynamics of single proton, multiple proton, and proton-coupled electron transfer reaction in the condensed phase. In W.L. Hase (Ed.) *Comparisons of Classical and Quantum Dynamics, Vol. II of Advances in Classical Trajectory Methods*, p. 73–119.

Lopez-Galindo, P., Fenoll Hach-Ali, Pushkarev, A. V., Lytovchenko, A. S., Baker, J. H., & Pushkarova, R. A. (2008). Tritium redistribution between water and clay minerals. *Applied Clay Science*, 39, 151–159.

Zakn, D., & Brickmann, J. (1999) Quantum-classical simulation of proton migration in water. *Jsr. J. Chem.*, 39 (3–4), 463–482.

References

Audi, G., Bersillon, O., Blachot, J., & Wapstra, A.H. (2003). The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties. *Nuclear Physics*, A 729, 3–128.

Bleam, W. F. (1990). The nature of cation substitution sites in phyllosilicates. *Applied Clay Minerals*, 38, 527–536.

Goldansky, V. I., & Trahtenberg, L. I. (1980). Tunneling phenomena in Chemical Physics. Gordon and Breach Science Publishers.

Hammes-Shiffer, S. (1998) Mixed quantum-classical dynamics of single proton, multiple proton, and proton-coupled electron transfer reaction in the condensed phase. In W. L. Hase (Ed.) *Comparisons of Classical and Quantum Dynamics, Vol. II of Advances in Classical Trajectory Methods*, (p. 73–119).

Lopez-Galindo, P., Fenoll Hach-Ali, Pushkarev, A. V., Lytovchenko, A. S., Baker, J. H., & Pushkarova, R. A. (2008). Tritium redistribution between water and clay minerals. *Applied Clay Science*, 39, 151–159.

Pushkarov, A. V., Rudenko, I. M., & Skrypkin, V. V. (2015). Adsorption of tritium from aqueous solutions by thermally treated clay minerals. *Visnyk of*

Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology, 71, 43–48. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.71.07> [in Ukrainian].

Pushkarov, O.V., & Prymachenko, V.M. (2010). Interaction of tritium water with clay minerals. *Collection of scientific works of the Institute of Environmental Geochemistry*, 18, 149–158 [in Ukrainian].

Pushkarov, O. V., Prymachenko, V. M., Zolkin, I. O. (2012). Properties of bentonite-zeolite composites for the extraction of tritium from tritium water. *Collection of scientific works of the Institute of Environmental Geochemistry*, 20, 98–107 [in Ukrainian].

Pushkarov, O. V., Rudenko, I. M., Dolin, V. V. (junior), & Prymachenko, V. M. (2014). Sepiolite-zeolite composites as potential water-permeable reactive barriers. *Collection of scientific works of the Institute of Environmental Geochemistry*, 23, 75–84 [in Ukrainian].

Pushkarov, O. V., Rudenko, I. M., Koshelev, M. V., Skrypkin, V. V., Dolin, V. V. (junior), & Prymachenko, V. M. (2016). Tritium mineral adsorbent based on saponite and zeolite. *Collection of scientific works of the Institute of Environmental Geochemistry*, 25, 38–48 [in Ukrainian].

Rudenko, I. M., Pushkarev, O. V., Dolin, V. V., Zubko, O. V., & Grechanovska, O. E. (2017). Tritium indicator of effectiveness of thermomodification of adsorption properties of clinoptilolite. *Mineralogical journal*, 39(2), 64–74. <http://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.02.064> [in Ukrainian].

Zakn, D., & Brickmann, J. (1999) Quantum-classical simulation of proton migration in water. *Jsr. J. Chem.*, 39 (3–4), 463–482.

Отримано редакцією журналу / Received: 11.08.23

Прорецензовано / Revised: 09.12.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Oleksandr PUSHKAREV¹, DSc (Geol.), Senior Researcher, Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0002-4382-8620
e-mail: pushkarevigns@gmail.com

Iryna SEVRUK¹, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-2407-0735
e-mail: Irina_mihalovna@ukr.net

Oleksandr ZUBKO¹, Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2521-8087
e-mail: g200709g@yahoo.com

Vitaly DOLIN¹, Engineer
ORCID ID: 0000-0002-1962-9277
e-mail: dolinvitaliy@gmail.com

Yuri DEMIKHOV¹, PhD (Geol. & Mineral.), Leading Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3576-6570
e-mail: IGNS_Demikhov@nas.gov.ua

Vadym SKRYPKIN¹, Researcher
e-mail: IGNS_Skrypkin@igns.gov.ua

¹SE "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

INTERACTION OF H(D,T)O WITH MINERAL ADSORBENTS IN STATIONARY SYSTEMS

Background. The theoretical basis of the experiments is the idea that the significant adsorption properties of layered silicates of the montmorillonite and palygorskite groups and clinoptilolite with a developed specific surface due to the dynamic nature of adsorption-desorption processes due to kinetic isotope effects can ensure priority retention of mineral particles of more inert hydroxide groups OT– near the adsorption surfaces.

Methods. Cherkasy bentonite with a montmorillonite content of 75 % (hereafter montmorillonite), Varvarivska saponite, and Sokyrnytsky clinoptilolite were used for the experiments. Experiments were performed in stationary mode in hermetically sealed containers (two-phase water-mineral system).

Results. During the first 7 days of interaction of the aqueous and mineral phases, the specific activity of tritium in the working solution decreased by 31.8–69.5 %. Subsequently, during the 92 days of interaction of the aqueous solution of H(D,T)O with mineral adsorbents, the change in the specific activity of tritium did not exceed 2–4 %. At the same time, the initial concentration of deuterium in the working solution of H(D,T)O of two-phase water-mineral systems decreased by only 0.8–14 %, ranging from 0.0066 % to 0.0408 %. During the experiment, in closed water-mineral systems, a partial interphase redistribution of the initial stock of hydrogen isotopes, which was accumulated in the initial working solution H(D,T)O, took place. In the process of adsorption of the solution by mineral adsorbents, the initial moisture in the mineral phase was replaced by H(D,T)O and the content of hydrogen isotopes increased in them. The content of tritium in the adsorbate, depending on the mineral type of the adsorbent, increased by 31.8 to 69.5 %. Concentration of deuterium increased by 10.1–48.6 %, which was due to the different adsorption capacity of mineral adsorbents. Adsorption of the H(D,T)O working solution by mineral adsorbents was accompanied by fractionation of heavy hydrogen isotopes.

Conclusions. As a result of the interaction of the H(D,T)O solution with mineral adsorbents, kinetic isotope effects determined the priority retention of more inert hydroxide OT-groups than OD- groups near the adsorption surface of mineral particles. Consequently, interphase fractionation of heavy hydrogen isotopes occurred in stationary water-mineral systems. The coefficients of tritium interphase fractionation range from $\alpha = 1.26$ for palygorskite to $\alpha = 2.96$ for clinoptilolite. For deuterium, this indicator is equal to $\alpha = 0.89$ for clinoptilolite and to $\alpha = 1.10$ for saponite.

Keywords: fractionation, tritium, deuterium, montmorillonite, sepiolite, saponite, palygorskite, clinoptilolite.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.07>

Володимир МИХАЙЛОВ, д-р геол. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-1837-9739

e-mail: vladvam@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ГІРНИЧОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ
У СВІТОВОМУ КОНТЕКСТІ*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. В.М. Загнітком)*

Розглянуто основні світові тенденції розвитку гірничодобувної галузі за останні роки; показано постійне зростання інтенсивності розробки земних надр і видобутку мінеральної продукції в останні десятиліття; виділено провідні видобувні країни світу, встановлено, що за об'ємом видобутку передові позиції займають Китай (23 % світового видобутку), США (12 %), Росія (9 %), Австралія (7 %), а за вартістю видобутої продукції – Китай, США, Росія, Саудівська Аравія та Австралія. Встановлено, що за останні роки (2015–2021) особливо бурхливим було зростання видобутку літію, рідкісних земель, ніобію, титану, бокситів, нікелю, флюориту, графіту та ін., у той час як видобуток олова, ртуті, сурми, урану, танталу, технічних алмазів та ін. знизився. Виявлено, що наприкінці 20-х років на розвиток гірничодобувної галузі негативно впливали наслідки пандемії, але вже наприкінці 2020 р. стан гірничорудної галузі почав покращуватися. Показано роль і місце України у світовій гірничорудній промисловості, яка за об'ємом видобутку посідає 24-те місце у світі, а за вартістю видобутої продукції – 36-те, займає повідні позиції у видобутку заліза, марганцю, титану та ін. За останні роки (2015–2021) в Україні суттєво збільшився видобуток заліза, марганцю, титану, польового шпату, графіту, сірки, коксівного вугілля, але видобуток галію, бентоніту, солі, циркону, вугілля, урану знизився.

Ключові слова: мінерально-сировинна база, гірничодобувна галузь, видобуток.**Вступ**

Постановка проблеми. Для прийняття управлінських рішень у галузі надрокористування потрібні маркетингові дослідження загального стану, тенденцій і перспектив розвитку мінерально-сировинної бази (МСБ) світу, місця і ролі України у світовому видобутку корисних копалин, чітке розуміння сильних і слабких сторін нашого гірничого сектору, проблем і перспектив розвитку МСБ нашої країни.

Аналіз попередніх досліджень. Існує багато досліджень щодо структури і розвитку МСБ різних корисних копалин світу, об'ємів їх видобутку і вартості (Mineral Commodity..., 2016–2021; World Exploration Trends, 2022; World Mining Data, 2020, 2021, 2022). Зведення щодо корисних копалин України також надається в численних наукових працях (Гурський, 2008; Михайлов, 2023; Мінеральні ресурси, 2020; Mikhailov et al., 2022, 2023).

Формулювання проблеми. Проблема полягає у відсутності об'єктивного аналізу ролі і положення України у світовому видобутку корисних копалин, тенденцій і напрямків розвитку її МСБ. Цим питанням і присвячена ця стаття.

Результати

Світові тенденції розвитку гірничодобувної галузі. За останні роки різко зросла інтенсивність розробки земних надр (табл. 1): якщо у 1984 р. світова мінеральна продукція становила 9,3 млрд т, то у 2000 р. – 17,3 млрд т, у 2019 р. вона досягла 18,0 млрд т. У 2021 р. об'єм світової мінеральної продукції незначно скоротився до 17,9 млрд т із загальною вартістю \$5 133 702 млн. Найбільший об'єм видобутку припадає на горючі корисні копалини (15,3 млрд т), на другій позиції – залізо і феросплави (1,7 млрд т), на третьому – неметалічні корисні копалини (0,8 млрд т), на четвертому – інші метали (0,1 млрд т). Список провідних видобувних країн світу наведено в табл. 2.

Як видно з таблиці, за об'ємом видобутку провідні позиції займають чотири країни, на які припадає половина всього видобутку: Китай (23 %), США (12 %), Росія (9 %)

і Австралія (7 %). Китай є світовим лідером з видобутку 32 видів мінеральної сировини, він посідає 1-ше місце у світі з видобутку (у % світового видобутку) вольфраму (80), ванадію (54), алюмінію (57), сурми (64), плавикового шпату (51), графіту (60), магнезиту (66), галію (94), германію (89), телуру (74), миш'яку (46), вісмуту (64), молибдену (36), кадмію (35), свинцю (44), титану (26), тальку (25), каоліну (18), бентоніту (26) та ін. У США видобувають 68 % світового об'єму берилію, 22 % природного газу і 15 % нафти. Росія посідає 1-ше місце у світі з видобутку (%) алмазів (28), паладію (41), азбесту (61), Австралія є лідером з видобутку літію (61), заліза (37), бокситів (29) і циркону (40).

У вартісному виразі список дещо змінюється, вочевидь, завдяки різній структурі мінерально-сировинного комплексу, трійка лідерів залишається той же самою, на 4-те місце виходить Саудівська Аравія, а Австралія – 5-те.

Цікаво відзначити, що за період з 2015 по 2019 р. особливо бурхливим було зростання світового видобутку літію (на 202,9 %), суттєво зросли об'єми видобутку рідкісних земель (62,3 %), ніобію (54,8 %), миш'яку (52,1 %), телуру (34,5 %), марганцю (33,8 %), нікелю (31,4 %), галію (31,2 %), бокситів (23,5 %), хрому (20,1 %), плавикового шпату (21,6 %), бентоніту (20,4 %). У той же час зменшився видобуток кобальту, молибдену, танталу, вольфраму, сурми, берилію, вісмуту, германію, ртуті, олова, цинку, платини, азбесту, бариту, бору, магнезиту, солі, вермикуліту.

За період з 2017 по 2021 р. найбільше зріс видобуток РЗЕ (на 102,1 %), суттєво (понад 10 %) збільшився видобуток титану, бокситів, нікелю, берилію, літію, германію, галію, ніобію, індію, телуру, селену, графіту, бору, флюориту, діатоміту, перліту, вермикуліту, але суттєво знизився видобуток олова, ртуті, сурми, урану, танталу, технічних алмазів (табл. 3).

На початку 20-х років XXI ст. основні тенденції розвитку гірничодобувної галузі визначалися негативними наслідками пандемії COVID-19, яка призвела до широкомасштабних змін у життєдіяльності людського

суспільства і падіння валового внутрішнього продукту (ВВП) багатьох країн, зокрема, ВВП ЄС знизився у 2020 р. на 14,9 %, ВВП США – на 9,5 % (World Exploration ..., 2021). Тому в першій половині 2020 р. гірничодобувна промисловість стикнулася зі значними випробуваннями, які призвели спочатку до падіння, а потім – до зростання цін на основні метали, закриття пошуково-розвідувальних проєктів і скорочення асигнувань на геологороз-

відувальні роботи. Зокрема, витрати на розвідку кольорових металів скоротилися на 11 % у річному виразі до \$8,7 млрд у 2020 р. з \$9,8 млрд у 2019 р. Особливо яскраво таке скорочення проявилось в першій половині 2020 р. Однак у другій половині 2020 р. ситуація дещо виправилася, ціна на кольорові метали змінила тенденцію на зростання, дослідницькі програми оновилися, хоча й в обмеженому вигляді.

Таблиця 1

Динаміка світової мінеральної продукції у 1984–2021 рр., т (World Mining..., 2020, 2021, 2023)

Рік	Чорні метали	Кольорові і рідкісні метали	Дорогоцінні метали	Індустріальна сировина	Енергетична сировина	Всього
1984	463 653 286	35 084 585	14 609	460 034 310	8 374 143 026	9 332 929 816
1985	510 052 413	35 280 131	15 039	468 017 624	8 632 008 924	9 645 374 131
1986	514 514 946	35 134 266	14 972	478 274 132	8 866 100 552	9 894 038 868
1987	527 743 082	36 715 179	15 754	493 253 351	9 022 185 833	10 079 913 199
1988	545 104 841	37 771 629	16 744	505 107 009	9 279 010 974	10 367 011 197
1989	563 035 654	39 457 040	17 189	508 179 916	9 570 906 201	10 681 596 000
1990	553 138 430	39 158 801	17 418	495 266 552	9 575 572 129	10 663 153 330
1991	554 426 795	39 133 368	17 000	473 973 296	9 443 788 547	10 511 339 006
1992	518 351 544	39 714 334	17 352	466 022 788	9 375 485 492	10 399 591 510
1993	527 354 970	39 121 393	16 581	453 542 362	9 330 148 521	10 350 183 827
1994	546 473 894	38 758 449	15 937	476 448 258	9 385 856 096	10 447 552 634
1995	577 003 628	40 425 344	16 863	493 200 047	9 665 259 246	10 775 905 128
1996	564 412 774	42 593 880	17 370	501 553 390	9 809 104 380	10 917 681 794
1997	590 662 477	44 044 133	18 567	518 080 782	9 986 638 623	11 139 444 582
1998	593 354 759	45 872 155	19 575	504 542 436	10 011 385 352	11 155 174 277
1999	582 302 931	47 973 981	19 871	532 629 932	9 911 925 207	11 074 851 922
2000	627 277 484	49 999 012	21 041	539 434 881	10 105 168 703	11 321 901 121
2001	596 561 401	50 557 341	21 628	537 057 554	10 329 585 282	11 513 783 206
2002	642 377 488	51 770 272	21 769	542 008 604	10 483 465 547	11 719 643 680
2003	692 928 163	54 904 665	21 737	589 890 476	11 058 691 275	12 396 436 316
2004	787 207 372	57 518 485	22 637	633 680 934	11 725 051 614	13 203 481 042
2005	858 612 467	60 526 878	23 216	656 649 518	12 229 188 782	13 805 000 861
2006	963 127 912	63 650 568	22 932	679 234 001	12 665 314 545	14 371 349 958
2007	1 064 353 923	68 904 072	23 447	693 078 079	13 001 956 404	14 828 315 925
2008	1 120 984 014	71 643 411	24 044	700 313 424	13 330 547 179	15 223 512 072
2009	1 103 080 437	68 786 771	25 518	673 755 493	13 140 965 067	14 986 613 286
2010	1 224 004 013	74 867 975	26 727	712 674 005	13 827 774 190	15 839 346 910
2011	1 308 602 816	78 343 726	26 914	740 569 092	14 392 333 109	16 519 875 657
2012	1 320 724 158	85 356 312	28 217	752 882 753	14 682 072 173	16 841 063 613
2013	1 401 844 672	90 051 397	29 533	781 216 623	14 752 253 330	17 025 395 555
2014	1 490 632 046	92 253 381	30 686	785 081 500	14 807 376 853	17 175 374 466
2015	1 494 789 495	96 193 095	31 861	790 281 214	14 833 656 268	17 214 951 933
2016	1 502 945 334	96 906 145	31 902	791 316 050	14 395 634 888	16 786 834 319
2017	1 554 609 380	98 050 174	30 800	802 011 255	14 806 182 843	17 260 884 452
2018	1 570 009 096	102 977 508	31 652	825 014 143	15 333 481 009	17 831 513 408
2019	1 599 612 882	102 815 267	31 845	810 856 834	15 504 305 583	18 017 622 411
2020	1 567 412 575	104 563 805	29 930	781 511 602	14 774 452 791	17 227 970 703
2021	1 682 971 493	107 665 438	29 604	809 971 978	15 296 261 104	17 896 899 617

Таблиця 2

Список провідних видобувних країн світу, 2021 р. (World Mining..., 2023)

№	Країна	Видобуток, млн т	№	Країна	Видобуток, млн т	№	Країна	Вартість, \$ млн	№	Країна	Вартість, \$ млн
1	Китай	4 639	23	Польща	120	1	Китай	879 461	23	Оман	33 317
2	США	2 217	24	Україна	108	2	США	652 348	24	Лівія	33 314
3	Росія	1 676	25	Колумбія	101	3	Росія	506 217	25	Колумбія	31 931
4	Австралія	1 310	26	Оман	93	4	Саудівська Аравія	289 925	26	Ангола	29 008
5	Індія	1 125	27	Гвінея	89	5	Австралія	246 674	27	Малайзія	27 008
6	Індонезія	684	28	Малайзія	87	6	Канада	223 136	28	Велика Британія	26 639
7	Саудівська Аравія	636	29	Єгипет	87	7	Індія	188 994	29	Єгипет	26 446
8	Канада	526	30	Туркменістан	79	8	ПАР*	169 302	30	Туреччина	26 128
9	Бразилія	504	31	Велика Британія	73	9	Бразилія	149 811	31	ДРК*	25 769
10	Іран	440	32	Лівія	73	10	Іран	136 975	32	Аргентина	23 205
11	ПАР*	296	33	В'єтнам	72	11	Індонезія	135 502	33	Азербайджан	22 768

Закінчення табл. 2

12	Казахстан	256	34	Таїланд	63	12	Ірак	105 610	34	Габон	21 944
13	ОАЕ*	218	35	Азербайджан	61	13	Казахстан	101 671	35	Венесуела	21 606
14	Катар	214	36	Аргентина	61	14	ОАЕ*	100 027	36	Україна	20 173
15	Ірак	210	37	Ангола	59	15	Мексика	80 599	37	Туркменістан	17 304
16	Норвегія	190	38	Венесуела	55	16	Норвегія	69 272	38	Узбекистан	16 877
17	Німеччина	166	39	Узбекистан	51	17	Кувейт	64 907	39	Польща	15 541
18	Мексика	153	40	Пакистан	50	18	Катар	64 402	40	В'єтнам	14 477
19	Алжир	146	41	Перу	38	19	Чилі	62 911	41	Німеччина	12 196
20	Туреччина	146	42	Чилі	31	20	Нігерія	49 411	42	Таїланд	9 980
21	Кувейт	135	43	Габон	15	21	Алжир	44 894	43	Пакистан	9 637
22	Нігерія	121	44	ДРК*	14	22	Перу	44 568	44	Гвінея	8 969

Примітка*: ДРК – Демократична Республіка Конго; ПАР – Південно-Африканська Республіка; ОАЕ – Об'єднані Арабські Емірати.

Таблиця 3

Динаміка видобутку корисних копалин у світі в 2017–2021 рр. (World Mining..., 2023)

Сировина	2017	2021	21/17	Сировина	2017	2021	21/17
Залізо, млн т	1 511,8	1 635,1	+8,26	Галій, т	310	434	+40,0
Марганець, млн т	18,8	21,2	+13,1	Тантал, т	2 301	1 760	-23,5
Хром, млн т	14,1	14,6	+3,8	Ніобій, тис. т	92,0	121,9	+32,5
Титан, тис. т	7 120,4	8 493,3	+19,3	Індій, т	782	917	+17,3
Ванадій, тис. т	81,9	88,5	+2,5	РЗЕ, тис. т	133,2	269,2	+102,1
Алюміній, млн т	60,5	67,7	+11,8	Реній, т	45	42	-6,7
Боксити, млн т	311,8	379,8	+21,8	Телур, т	613	734	+19,7
Мідь, млн т	20,1	21,4	+6,6	Селен, т	3 005	3 710	+23,5
Свинець, тис. т	4 654,2	4 680,6	+0,6	Алмаз ювелірний, млн кар.	81,2	75,3	-7,2
Цинк, тис. т	11 899,0	12 928,7	+8,7	Алмаз технічний млн кар.	69,6	42,9	-38,3
Нікель, тис. т	2 141,8	2 812,8	+31,30	Фосфати, млн т	79,6	75,4	-5,3
Кобальт, тис. т	138,7	134,5	-3,04	Барит, тис. т	8 954,5	8 369,3	-6,5
Молібден, тис. т	285,4	267,7	-6,2	Азбест, тис. т	1 157,1	1 292,4	+11,7
Вольфрам, тис. т	86,4	88,5	+2,5	Графіт, тис. т	896,3	1 167,4	+30,3
Олово, тис. т	315,9	271,3	-14,2	Бор, тис. т	4 228,7	4 919,8	+16,34
Ртуть, т	2 396	1 657	-30,8	Флюорит, тис. т	5 750,0	8 391,9	+45,9
Сурма, тис. т	148,9	94,0	-36,9	Бентоніт, млн т	21,2	18,8	-11,4
Миш'як, тис. т	57,4	54,9	-4,4	Діатоміт, тис. т	2 242,9	2 543,3	+19,39
Вісмут, т	10 607	11 143	+5,1	Польовий шпат, млн т	31,5	35,9	+13,8
Кадмій, т	26 777	24 770	-7,5	Гіпс, млн т	155,9	172,8	+10,9
Золото, т	3 336,5	3 235,2	-3,0	Каолін, млн т	45,2	43,3	-4,1
Срібло, т	27 054,5	25 342,6	-4,1	Магnezит, млн т	28,5	28,0	-1,5
Платина, т	184,6	190,9	+3,4	Перліт, тис. т	2 375,8	3 702,7	+55,9
Паладій, т	204,6	212,6	+3,9	Солі калійні, K ₂ O, млн т	42,3	45,2	+6,7
Родій, т	23,1	24,5	+6,1	Сіль, млн т	282,6	273,8	-3,1
Уран, т	70 402	56 155	-20,2	Сірка, млн т	79,6	76,8	-3,5
Берилій, т	5 306	6 716	+26,6	Тальк, тис. т	8 278,5	7 695,3	-7,0
Літій, тис. т	162,7	232,5	+42,9	Вермикуліт, тис. т	416,1	516,0	+24,0
Германій, т	98	142	+44,9	Циркон, тис. т	1 379,4	1 456,1	+5,6

Гірничодобувну галузь суттєво підтримало зростання цін на основні метали. Так, ціни на золото досягли рекордних позначок 2063 \$/унцію (6.08.2020 р.), хоча потім на початку 2021 р. вони знизилися до 1728,80 \$/унцію (26.02.2021). Ціна залізної руди зросла з 80 \$/т у лютому до 177 \$/т у грудні 2020 р. Ціна на мідь протягом 2020 р. збільшилася на 68 % і досягла максимальних позначок у 9 614,50 \$/т (25.02.2021) – максимальний рівень з 2011 р. Ціна на цинк зросла до 289,40 \$/т (25.02.2021) – найвищий рівень з травня 2019 р. Ціни на нікель за 2020 р. зросли на 18 %, перевищили 20 000 \$/т (22.02.2021), хоча потім дещо знизилася до 18 653 \$/т (26.02.2021).

У 2020 р. дещо підвищився обсяг фінансування геологорозвідувальних робіт на золото і срібло, у той час як фінансування ГРР на мідь, цинк, літій і кобальт зменшилося. Так, порівняно з 2019 р. фінансування ГРР на мідь скоротилося на 24 %, чи на \$561 млн; на цинк – на 21 %; на нікель – на 5 %. Основним критерієм інвестування був низький рівень ризику капіталовкладень, тому найбільше постраждало фінансування ГРР ранніх стадій (пошуково-розвідувальні роботи), менше – розвідка вже відкритих родовищ, обсяг фінансування якої зменшився

лише на 4 %, чи на \$147 млн порівняно з 2019 р., у той час як фінансування ранніх стадій ГРР зменшилося на 19 %. Відповідно зменшилася й кількість нових об'єктів проведення ГРР, яких у 2020 р. було зареєстровано тільки 52, п'ятирічний мінімум, дуже далекий від максимуму 2012 р., коли було зафіксовано 175 нових об'єктів.

Бюджетні асигнування на геологорозвідку скоротилися у всіх регіонах, особливо в Латинській Америці, де скорочення сягало 21 % (\$556 млн), у той час як у США, Канаді, Австралії воно становило близько 1,5 % (рис. 1). У Росії бюджетні асигнування ГРР зросли на 6 % (на \$24 млн), у той час як у Китаї вони скоротилися на 20 %. Бюджет ГРР Австралії в 2020 р. становив \$1,37 млрд, що на 10,3 %, чи \$158 млн менше, ніж у 2019 р. У Канаді зниження сягало 1,5 %, чи \$19 млн, насамперед за рахунок зниження асигнувань ГРР на уран, свинець і цинк, кобальт і мідь. У той же час вони зросли для золота (на \$55 млн) і для срібла (на \$13 млн). В Африці відбулося скорочення асигнувань на ГРР на 10 %, у тому числі на золото – на 11 %, на мідь – на 26 %. Скорочення асигнувань у США сягало 1,5 % (\$14 млн), а в Азійсько-Тихоокеанському регіоні – 16 % (\$50 млн).

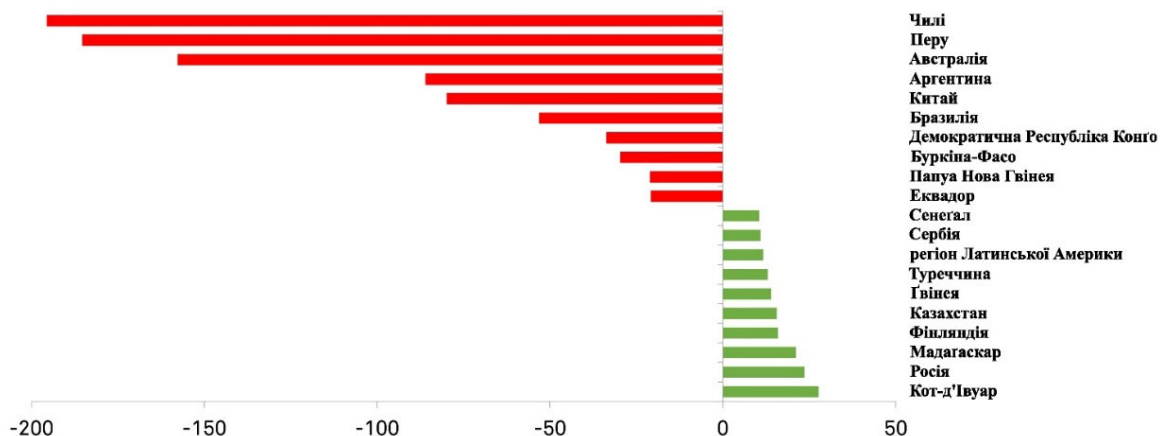


Рис. 1. Країни з найбільшою зміною бюджету на ГРП в 2020 р. (World Exploration..., 2021)

У 2020 р. всього у світі було пробурено 41 026 розвідувальних свердловин по 1098 проектах, що дещо більше результатів 2019 р. (38 958 свердловин по 1093 проектах). Найбільшу кількість свердловин було пробурено по золоторудних проектах, у той час як об'єми буріння на срібло, МПГ, кобальт, мідь, молібден, свинець, цинк знизились.

Вже у 2021 р. світова гірничорудна промисловість починає відновлюватися, прибутки збільшуються, ціни на сировину, об'єми буріння зростають (World Exploration..., 2022).

Завдяки цьому суттєво збільшився так званий індекс Pipeline Activity Index (PAI), який віддзеркалює зацікавленість потенційних клієнтів у проведенні ГРП. У 2021 р. він сягав у середньому 137 (у березні 2021 р. – 149), тоді як у 2020 р. – 98. Зросло і фінансування ГРП до \$11,24 млрд проти \$8,35 млрд у 2020 р. Експерти прогнозували підвищення глобального бюджету на ГРП на 5–15 % у 2022 р., але вторгнення Росії в Україну 24.02.2022 р. зумовило невизначеність щодо товарних ринків і глобальної економіки загалом, що завадило інтенсифікації ГРП.

У 2021 р. інтенсивно розвивалася так звана зелена енергетика і ринок електромобілів, що спричинило підвищення попиту на срібло і мідь у першому випадку, а у другому – на нікель, кобальт і літій. З іншого боку, зростання цін на енергію в Європі і Китаї призвело до зупинки багатьох плавильних і очисних підприємств, особливо для цинку, а обмеження виробництва електроенергії в Китаї у другій половині 2021 р. – до скорочення виробництва сталі. Це спровокувало зростання цін на ці метали, зокрема, 8 березня 2021 р. ціна цинку на Лондонській біржі металів (LME) сягнула 15-річного максимуму в \$4136 за тону, ціни на залізну руду досягли у травні 2021 р. 233,10 \$/т, ціна нікелю у 2021 р. зросла на 21 %, а міді – на 22 % (рис. 2).

Після лютого 2022 р. різко зросли ціни на паладій і 8 березня 2022 р. вони сягали \$3180,29 за унцію. Одночасно збільшились ціни на золото, які перевищили \$2000 за унцію (10.03.2022), на нікель – до 33 350 \$/т (8.03.2022).

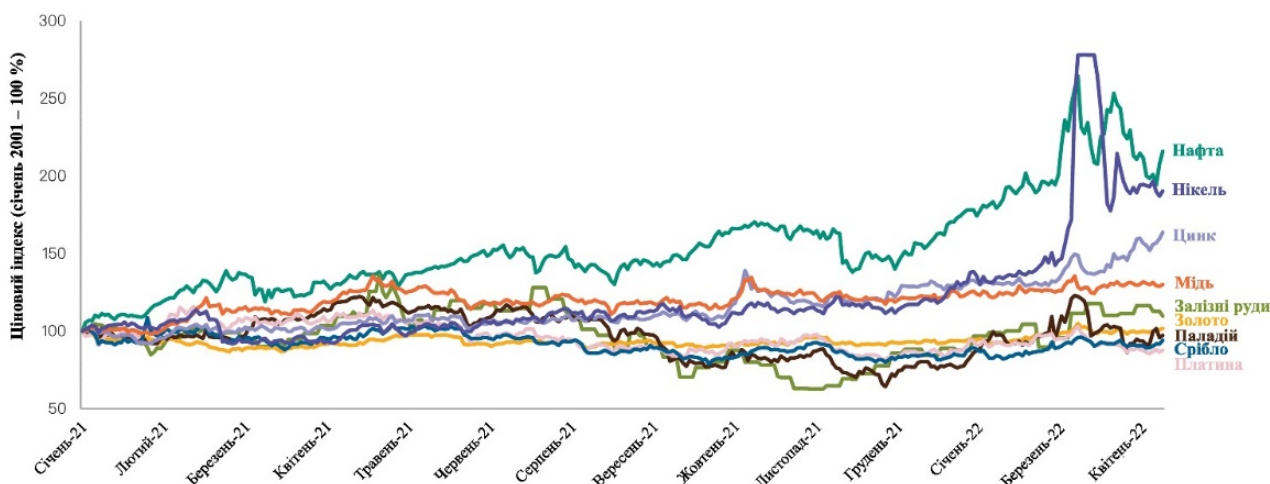


Рис. 2. Вартість мінеральної сировини у 2021–2022 рр. (World Exploration..., 2022)

Завдяки цим змінам витрати на ГРП у 2021 р. почали відновлюватися після скорочення у 2020 р. на 10 %, хоча вони й не досягли рівня 2019 р. Загальні світові витрати на пошукові роботи у 2021 р. зросли на 45 % (до \$2,91 млрд). Вартість ГРП на кольорові метали збільшилась у 2021 р. на 35 % (до \$11,24 млрд); кількість геологорозвідувальних компаній зросла на 10 % (до 1948), хоча не досягла рівня 2011–2012 рр., коли на ринку їх

працювало 2500. Зросли обсяги фінансування ГРП на золото, особливо в Канаді, США, Австралії, мідь (на 31%), нікелю (на 27%), літій (на 25%), кобальт (на 27%).

Особливо інтенсивне зростання фінансування ГРП відбулося в Канаді – до (на 62 %, чи \$799 млн – до \$2,09 млрд), Австралії (на 39 %, чи на \$531 млн – до \$1,9 млрд), США (на 37 % – до \$1,28 млрд), Латинський Америці (на 29 %, чи на \$591 млн – до \$2,66 млрд), Росії

(на 24 % – до \$535 млн), Китаї (на 59 % – до \$495 млн), Саудівській Аравії (на 155 % – до \$85 млн), Африці та Азійсько-Тихоокеанському регіоні (по 12 %) (рис. 3, 4). В Африці збільшилось асигнування на золото (на 18 %), скоротилися – на мідь, алмази, свинець, цинк, літій. Тут зросло фінансування ГРР у Буркіна-Фасо (до \$126 млн),

Малі (до \$129 млн), але скоротилося у Демократичній Республіці Конго (ДРК) (\$130 млн), Кот-д'Івуарі (\$88 млн). В Азійсько-Тихоокеанському регіоні збільшилось фінансування ГРР в Індонезії (до \$129 млн), на Філіппінах (до \$32 млн), але скоротилося в Папуа Новій Гвінеї (ПНГ) (\$58 млн).

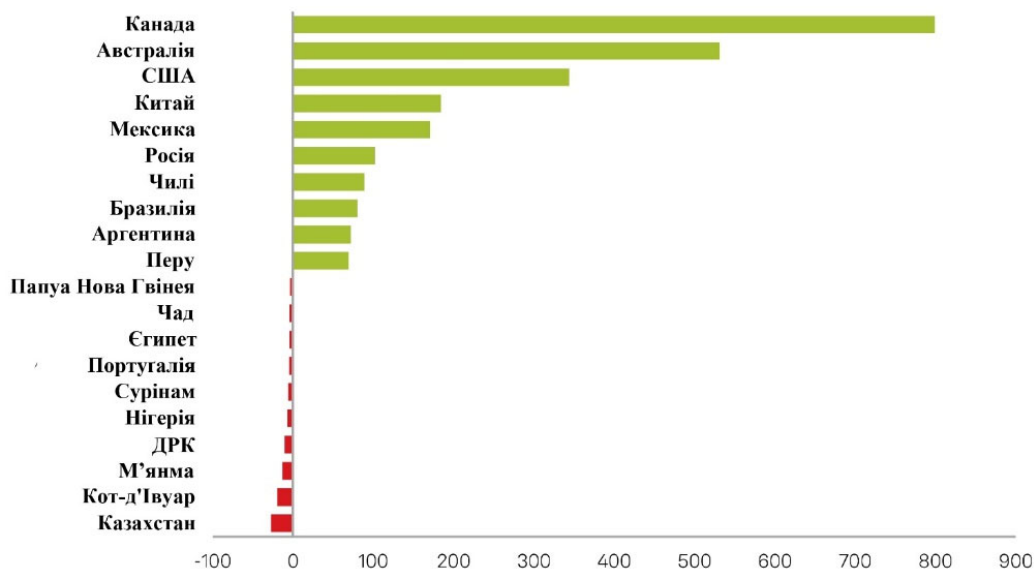


Рис. 3. Країни з найбільшою зміною державного бюджету на ГРР у 2021 р. (World Exploration..., 2022)

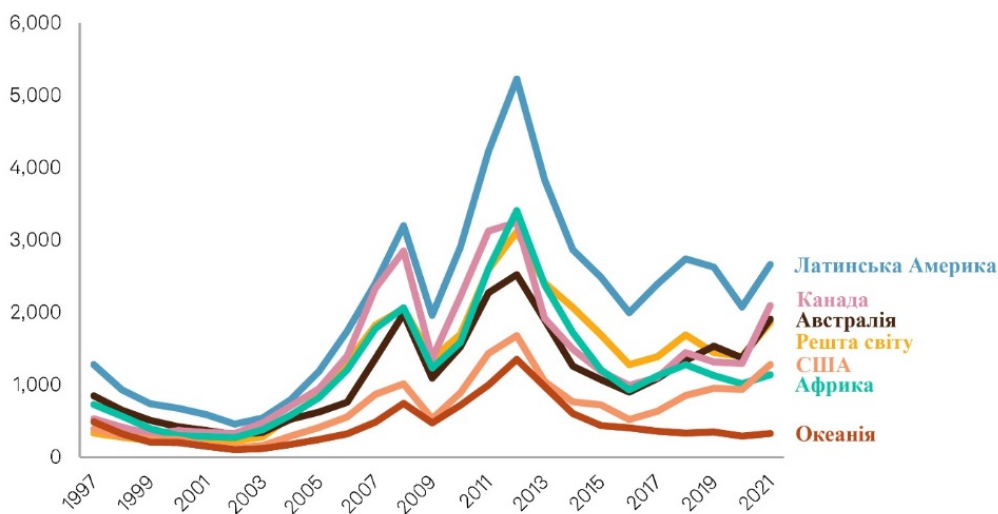


Рис. 4. Асигнування на ГРР за регіонами світу у 1997–2021 рр. (\$M) (World Exploration..., 2022)

У 2021 р. всього у світі було пробурено 68 982 розвідувальних свердловин по 1611 проєктах (зростання на 47 % і 68 % відповідно). Найбільшу кількість свердловин було пробурено по золоторудних проєктах (49 858 свердловин), збільшились об'єми буріння на свинець і цинк (2466 свердловин), інші кольорові метали (599), спеціальні метали (3630), мідь (4710), срібло (4250), нікель (2231), мінерали платинової групи (МПГ) (1238).

Найбільшу кількість бурових проєктів зафіксовано в Австралії (479), Канаді (443), США (176), Мексиці (81); кількість свердловин в Австралії зросла до 27 143, в Канаді – до 12 078 (рис. 5).

Гірничорудна галузь України. Україна за об'ємом видобутку (2021 р.) посідає 24-те місце (107,7 млн т), а у вартісному списку переміщується на 36-те місце (\$20 173 млн). Враховуючи її значну МСБ, за якою, на

думку деяких дослідників, вона посідає за різними оцінками 10–15-те місце у світі, це свідчить про недостатній розвиток гірничо-видобувного комплексу нашої країни. Разом з тим Україна посідає провідні місця у видобутку (2021 р.): заліза – 6-те місце (3,2 % світового видобутку), марганцю – 7-ме (3,1 %), титану – 5-те (5,8 %), галію – 3-тє (0,9 %), бентоніту – 16-тє (0,7 %), польового шпату – 27-ме (0,2 %), графіту – 9-тє (1,5 %), каоліну – 8-ме (5,4 %), солі – 21-ше (0,7 %), сірки – 35-тє (0,3 %), циркону – 11-тє (1,9 %), вугілля – 13-тє (0,4 %), коксівного вугілля – 10-тє (0,7 %), природного газу – 32-тє (0,5 %), нафти – 53-тє (0,1 %), урану – 9-тє (1,0 %).

У табл. 4 на основі закордонних даних наведено динаміку видобутку найважливіших корисних копалин в Україні. Як видно, за сім років – з 2015 по 2021 р. в країні суттєво збільшився видобуток заліза, марганцю, титану,

польового шпату, графіту, каоліну, сірки, коксівного вугілля, але знизився видобуток галію, бентоніту, солі, циркону, вугілля, урану. Особливе занепокоєння викликає різке зменшення видобутку у 2019 р. порівняно з 2018 р.

таких видів корисних копалин, як галій, бентоніт, графіт, циркон, вугілля, уран. Ці дані треба враховувати під час оцінки інвестиційної привабливості МСБ України.

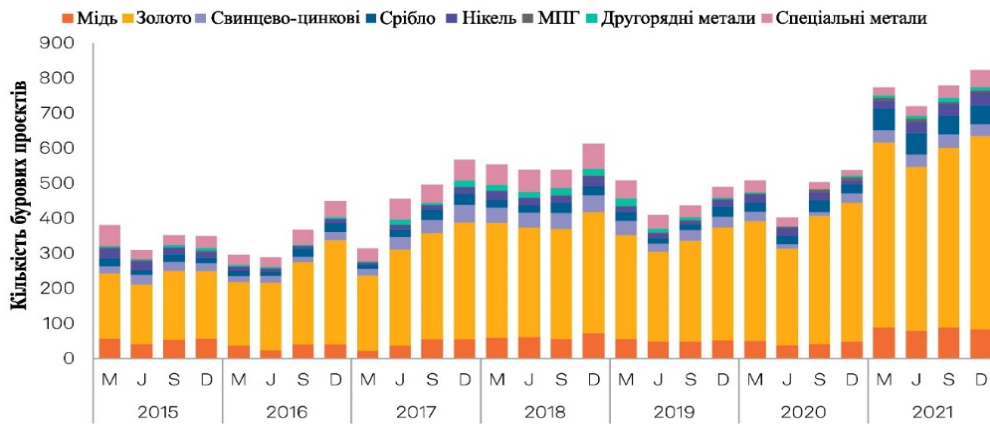


Рис. 5. Кількість бурових проєктів у світі в 2015-2021 рр. (World Exploration..., 2022)

Таблиця 4

Динаміка видобутку найважливіших корисних копалин України (World Mining..., 2021, 2023)

Сировина	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2021/2015 %
Залізо, т	42 817 200	40 240 600	38 767 600	38 751 300	47 584 000	49 274 000	52 431 000	+22,5
Марганець, т	546 600	491 500	650 500	682 700	698 100	698 500	652 300	+19,3
Титан, т	375 480	339 800	430 300	518 950	564 050	537 430	489 200	+30,3
Галій, т	9	9	9	6	5	4	4	-55,6
Германій, т	1	1	1	1	1	1	1	0
Бентоніт, т	220 000	200 000	113 200	178 200	124 700	125 000	125 000	-43,2
Польовий шпат, т	44 460	33 627	35 000	50 000	60 000	50 000	60 000	+35,0
Графіт, т	10 000	12 000	13 000	15 000	10 000	10 000	17 000	+70,0
Гіпс, т	1 254 900	1 303 000	1 528 900	1 386 400	1 409 400	1 529 000	1 783 300	+42,1
Каолін, т	1 814 786	2 335 004	2 379 636	2 091 525	1 843 561	1 680 891	2 317 723	+27,7
Сіль, т	2 136 500	1 783 530	1 815 684	2 191 619	2 092 795	2 075 000	1 900 000	-11,1
Сірка, т	171 700	171 300	175 900	222 200	220 400	223 500	255 600	+48,9
Циркон, т	30 000	29 280	27 239	21 614	18 000	16 000	27 000	-10,0
Вугілля, т	23 852 700	25 121 500	18 932 900	21 648 100	19 747 200	17 733 500	22 153 000	-7,1
Коксівне вугілля, т	6 063 900	6 508 800	5 233 900	4 606 300	5 783 200	6 434 800	7 234 000	+19,3
Газ, млрд м³	19 900	20 052	20 510	20 806	20 520	20 183	19 757	-0,7
Нафта, т	2 533 300	2 272 100	2 169 900	2 293 300	2 453 600	2 430 800	2 455 400	-3,1
Уран, т	1 156	1 185	986	1 390	944	877	536	-53,6
Всього, т	97 792 692	96 884 836	88 682 655	91 303 405	99 013 956	98 965 703	107 706 664	+10,1

Таким чином, експлуатація МСБ є суттєвим чинником економіки нашої країни і забезпечує значну частку її валового внутрішнього продукту (ВВП). За співвідношенням частки внеску МСК до ВВП 122 видобувних країн світу (2019 р.) Україна займає середню позицію – 55-те місце в рейтинговому списку зі співвідношенням 7,35 % (табл. 5). Верхні щаблі рейтингового списку займають такі країни, як Конго (87,10 %), Монголія (75,42 %), Габон (70,40 %), Казахстан (58,67 %), Лівія (50,99 %), а нижні – переважно розвинені країни з високим рівнем промислового виробництва: Велика Британія (1,03 %), Німеччина (0,26 %), Іспанія (0,25 %), Ірландія (0,19 %), Італія (0,15 %), Франція (0,07 %), Південна Корея (0,04 %), Японія (0,02 %). У загальній структурі народного господарства цих країн мінерально-сировинні ресурси не відіграють значної ролі. З іншого боку, країни з розвиненою МСБ і високим промисловим потенціалом займають в рейтинговому списку середні позиції: Росія (25,57 %), Австралія (12,97 %), Канада (9,94 %), Індонезія (8,95 %), Бразилія (6,39 %), Мексика (5,67 %), Індія (4,54 %), Китай (4,08 %), США (2,57 %). Отже, можна вважати, що співвідношення частки внеску мінерально-сировинного комплексу до ВВП в Україні є більш-менш збалансованим і відповідає середньосвітовим показникам.

За об'ємом і вартістю продукції МСК Україна поступається таким країнам, як Китай, США, Росія, Австралія, Індія, Індонезія, Саудівська Аравія, Канада, Бразилія, Іран, ПАР, Казахстан, ОАЕ, Катар, Ірак, Норвегія; приблизно відповідає таким країнам, як Німеччина, Туреччина, Польща, Колумбія, Оман, Туркменістан, Велика Британія; перевищує такі країни, як В'єтнам, Таїланд, Узбекистан, Пакистан (табл. 6).

Дискусія і висновки

Розглянуто основні світові тенденції розвитку гірничодобувної галузі за останні роки; показано постійне зростання інтенсивності розробки земних надр і видобутку мінеральної продукції в останні десятиліття; виділено провідні видобувні країни світу, встановлено, що за об'ємом видобутку провідні позиції займають Китай (23 % світового видобутку), США (12 %), Росія (9 %), Австралія (7 %), а за вартістю видобутої продукції – Китай, США, Росія, Саудівська Аравія та Австралія. Встановлено, що за останні роки (2015–2021) особливо бурхливим було зростання видобутку літію, рідкісних земель, ніобію, титану, бокситів, нікелю, флюориту, графіту та ін., у той час як видобуток олова, ртуті, сурми, урану, танталу, технічних алмазів та ін. знизився. Встановлено, що наприкінці 20-х років в розвиток гірничодобувної

галузі негативно впливали наслідки пандемії, але вже наприкінці 2020 р. стан гірничорудної галузі почав покращуватися. Показано роль і місце України у світовій гірничорудній промисловості, яка за об'ємом видобутку посідає 24-те місце у світі, а за вартістю видобутої продукції – 36-те місце,

провідні місця у видобутку заліза, марганцю, титану та ін. За останні роки (2015–2021) в Україні суттєво збільшився видобуток заліза, марганцю, титану, польового шпату, графіту, сірки, коксівного вугілля, але видобуток галію, бентоніту, солі, циркону, вугілля, урану знизився.

Таблиця 5

Питома вага мінеральної продукції у ВВП держав світу (2019 р., \$ млн)

№	Країна	ВВП	Вартість продукції	% у ВВП	№	Країна	ВВП	Вартість продукції	% у ВВП
1	Конго	9 640	8 396	87,10	62	Нігер	12 735	689	5,41
2	Монголія	12 291	9 271	75,42	63	Естонія	30 738	1 633	5,31
3	Габон	15 511	10 920	70,40	64	Камерун	38 004	1 966	5,17
4	Казахстан	157 872	92 631	58,67	65	В'єтнам	242 274	12 196	5,03
5	Лівія	53 008	27 027	50,99	66	Ісландія	24 634	1 225	4,97
6	Зімбабве	19 836	9 767	49,24	67	Сенегал	22 963	1 131	4,93
7	Ірак	232 981	111 371	47,80	68	Аргентина	432 302	20 053	4,64
8	Екв. Гвінея	8 330	3 947	47,38	69	Індія	2 843 902	129 033	4,54
9	Азербайджан	45 987	20 181	43,88	70	Китай	14 308 060	583 714	4,08
10	Суринам	3 562	1 486	41,72	71	Танзанія	61 578	2 497	4,06
11	Ангола	87 199	32 042	36,75	72	Туніс	37 391	1 401	3,75
12	Оман	75 745	29 289	38,67	73	Боснія і Герцег.	20 016	718	3,59
13	ПАР	341 523	124 963	36,59	74	Сербія	48 636	1 726	3,55
14	Сауд. Аравія	800 937	276 745	34,55	75	Нікарагуа	12 200	427	3,50
15	Албанія	15 122	5 157	34,10	76	Йорданія	43 429	1 522	3,50
16	ДР Конго	45 879	13 688	29,84	77	Болгарія	66 046	2 310	3,50
17	Гвінея	12 819	3 697	28,84	78	Туреччина	741 899	25 486	3,44
18	Бруней	13 831	3 985	28,81	79	Косово	8 093	240	2,97
19	Катар	179 057	50 318	28,10	80	Півн. Македонія	12 193	362	2,97
20	Чад	11 141	2 975	26,70	81	США	21 624 996	555 067	2,57
21	Росія	1 646 524	421 049	25,57	82	Пакистан	296 935	7 597	2,56
22	ПНГ	24 426	6 131	25,10	83	Фінляндія	268 153	6 265	2,34
23	Судан	18 286	4 495	24,58	84	Руанда	9 798	218	2,22
24	Алжир	165 788	38 699	23,34	85	Того	5 481	115	2,10
25	Мозамбік	14 573	3 393	23,28	86	Польща	566 087	11 726	2,07
26	Гайана	4 192	961	22,92	87	Грузія	17 039	342	2,01
27	Гана	65 527	14 970	22,85	88	Ямайка	15 814	317	2,00
28	ОАЕ	423 201	95 533	22,57	89	Філіппіни	414 269	8 192	1,98
29	Замбія	22 767	5 098	22,39	90	Таїланд	523 598	9 526	1,82
30	Узбекистан	58 795	12 629	21,48	91	Марокко	116 445	1 974	1,79
31	Мавританія	7 503	1 531	20,41	92	Панама	62 397	992	1,59
32	Трин. і Тобаго	23 824	4 622	19,40	93	Румунія	246 657	3 933	1,59
33	Болівія	40 101	7 061	17,61	94	Ботсвана	16 961	253	1,49
34	Малі	17 055	2 990	17,53	95	Гватемала	75 435	998	1,32
35	Ліберія	2 718	471	17,33	96	Нова Зеландія	201 059	2 431	1,21
36	Киргизстан	7 837	1 321	16,86	97	Афганістан	19 402	228	1,17
37	Буркіна-Фасо	15 326	2 527	16,49	98	Гондурас	23 181	265	1,14
38	Перу	216 266	34 061	15,75	99	Велика Британія	2 788 384	28 852	1,03
39	Чилі	270 972	42 445	15,66	100	Бангладеш	316 907	2 959	0,93
40	Бахрейн	36 313	5 011	13,80	101	Греція	209 532	1 880	0,90
41	Таджикистан	9 447	1 310	13,87	102	Чехія	235 412	1 993	0,85
42	Австралія	1 346 629	174 640	12,97	103	Данія	357 272	2 763	0,77
43	Еквадор	104 330	12 830	12,30	104	Хорватія	59 493	440	0,74
44	Нігерія	433 450	52 678	12,15	105	Швеція	544 936	3 983	0,73
45	Норвегія	420 118	50 600	12,04	106	Ізраїль	394 597	2 547	0,65
46	Білорусь	61 171	7 144	11,68	107	Словаччина	103 878	506	0,49
47	Намібія	12 019	1 249	10,39	108	Угорщина	155 153	721	0,46
48	Канада	1 718 554	170 820	9,94	109	Нідерланди	912 197	4 190	0,46
49	Лаос	17 746	1 743	9,82	110	Словенія	52 973	194	0,37
50	Мадагаскар	13 629	1 323	9,71	111	Португалія	231 998	858	0,37
51	Колумбія	313 494	30 874	9,85	112	Кенія	93 578	328	0,35
52	Індонезія	1 085 709	97 180	8,95	113	Коста-Рика	58 186	203	0,35
53	Єгипет	292 150	23 225	7,95	114	Німеччина	3 957 759	10 460	0,26
54	Вірменія	13 901	1 038	7,47	115	Іспанія	1 396 930	3 461	0,25
55	Україна	158 534	11 654	7,35	116	Ірландія	299 747	565	0,19
56	М'янма	73 292	5 346	7,29	117	Австрія	445 912	749	0,17
57	Малайзія	354 198	23 511	6,64	118	Ефіопія	95 641	158	0,17
58	Бразилія	1 790 969	114 529	6,39	119	Італія	2 018 377	3 026	0,15
59	Кот-д'Івуар	56 976	3 484	6,11	120	Франція	2 768 040	2 074	0,07
60	Сьєрра-Леоне	3 668	217	5,92	121	Південна Корея	1 657 553	662	0,04
61	Мексика	1 221 112	69 236	5,67	122	Японія	5 263 538	1 119	0,02

Примітка. В розрахунок бралися країни з вартістю мінеральної продукції не нижче як \$100 млн.

Таблиця 6

Співвідношення об'єму і вартості продукції мінерально-сировинного комплексу України (прийнято за одиницю) і деяких інших країн (2021 р.)

Країна	Об'єм продукції	Вартість продукції	Країна	Об'єм продукції	Вартість продукції	Країна	Об'єм продукції	Вартість продукції
Китай	43,0	43,6	Ірак	1,9	5,0	Туркменістан	0,7	0,9
США	20,5	32,3	Норвегія	1,8	3,4	ВБ	0,7	1,3
Росія	15,5	25,1	Німеччина	1,5	0,6	Лівія	0,7	1,7
Австралія	12,1	12,2	Мексика	1,4	4,0	В'єтнам	0,7	0,7
Індія	10,4	9,4	Алжир	1,4	2,2	Таїланд	0,6	0,5
Індонезія	6,3	6,7	Туреччина	1,4	1,3	Азербайджан	0,6	1,1
СА	5,9	14,4	Кувейт	1,3	3,2	Аргентина	0,6	1,2
Канада	4,9	11,1	Нігерія	1,1	2,4	Ангола	0,5	1,4
Бразилія	4,7	7,4	Польща	1,1	0,8	Венесуела	0,5	1,1
Іран	4,1	6,8	Колумбія	0,9	1,6	Узбекистан	0,5	0,8
ПАР	2,7	8,4	Оман	0,9	1,7	Пакистан	0,5	0,5
Казахстан	2,4	5,0	Гвінея	0,8	0,4	Перу	0,4	2,2
ОАЕ	2,0	5,0	Малайзія	0,8	1,3	ДРК	0,1	1,3
Катар	2,0	3,2	Єгипет	0,8	1,3	Чилі	0,3	3,1

Список використаних джерел

- Гурський, Д. С. (2008). *Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин*. ЗУКЦ.
- Михайлов, В. А. (2023). *Стратегічні корисні копалини України та їхня інвестиційна привабливість*. ВПЦ "Київський університет". http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf
- Мінеральні ресурси України. (2020). Щорічник. ДВНП "Геоінформ України". http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf
- Mineral Commodity Summaries (2016–2021). Wash.: USGS. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., & Malyuk, B. I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. *Geological Society*, London, Special Publications. 2022-03-28 | Journal article. <https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133>
- Mykhailov, V., Malyuk, B., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Horwath, Z., Baubault, A., & Chabot, L. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Orleans, France: BRGM.
- World Exploration Trends (2021). PDAC Special Edition. April 2021.
- World Mining Data (2020). C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna. Vol. 35.
- World Mining Data (2021). C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna. Vol. 36.
- World Mining Data (2023). C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna. Vol. 38. <https://world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2023.pdf>

References

- Gurski D. S. (2008). *Conceptual principles of the state mineral and raw materials policy regarding the use of minerals strategically important for the country's economy*. ZUKTS [in Ukrainian].
- Mineral Commodity Summaries (2016–2021). Wash.: USGS. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- Mineral resources of Ukraine. (2020). Yearbook. DVNP "Geoinform of Ukraine". http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf [in Ukrainian].
- Mykhailov V. A. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. "Kyiv University". http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf [in Ukrainian].
- Mykhailov, V., Malyuk, B., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Horwath, Z., Baubault, A., & Chabot, L. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. Orleans, France: BRGM.
- Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., Malyuk, B. I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. *Geological Society*, London, Special Publications. 2022-03-28 Journal article. <https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133>
- World Exploration Trends (2021). PDAC Special Edition. April 2021.
- World Mining Data (2020). Reichl, C., M. Schatz, Mineral Production. Vienna, Vol. 35.
- World Mining Data (2021). C. Reichl, M. Schatz, Mineral Production. Vienna, Vol. 36.
- World Mining Data (2023). C. Reichl, M. Schatz. Mineral Production. Vienna, Vol. 38. <https://world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2023.pdf>
- Отримано редакцією журналу / Received: 17.07.23
Прорецензовано / Revised: 03.09.23
Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Volodymyr MYKHAILOV, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-1837-9739
e-mail: vladvam@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT TRENDS OF THE MINING INDUSTRY OF UKRAINE IN THE GLOBAL CONTEXT

The main global trends in the development of the mining industry in recent years are considered; a constant increase in the intensity of development of the earth's subsoil and extraction of mineral products in recent decades is shown; the world's largest mining countries are highlighted. It was established that China (23 % of world production), the USA (12 %), Russia (9 %), and Australia (7 %) are the leading countries in terms of production volume. China, the USA, Russia, Saudi Arabia and Australia are the leaders in terms of the value of mined products. It has been established that in recent years (2015–2021) the growth of mining of lithium, rare earths, niobium, titanium, bauxite, nickel, fluorite, graphite, etc. was especially rapid, while the mining of tin, mercury, antimony, uranium, tantalum, technical diamonds, etc. decreased. It was established that at the end of the 20s, the development of the mining industry was negatively affected by the consequences of the pandemic, but already at the end of 2020, the state of the mining industry began to improve. The role and place of Ukraine in the global mining industry is shown, which ranks 24th in the world in terms of volume of production, and 36th in terms of the value of mined products; and takes leading positions in the production of iron, manganese, titanium, etc. In recent years (2015–2021), the production of iron, manganese, titanium, feldspar, graphite, sulfur, and coking coal has increased significantly in Ukraine, but the production of gallium, bentonite, salt, zircon, coal, and uranium has decreased.

Keywords: mineral resource base, mining industry, mineral extraction.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 553.041

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.08>

Марія КУРИЛО, д-р геол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-1411-2754

e-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Софія КОШАРНА, канд. геол. наук

ORCID ID: 0000-0002-4523-1086

e-mail: sofiia.kosharna@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СТРАТЕГІЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВІТЧИЗНЯНИХ РОДОВИЩ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)

В умовах сталого розвитку переорієнтування широкого кола технологічних галузей є неминучим явищем, яке зумовлює пертурбації усталеного переліку сировини, що має стратегічне значення. Зміни пріоритетів у першу чергу зумовлені потребою переходу до інноваційних підходів з метою вирішення старих проблем та забезпечення всіх потреб сучасного суспільства. І наразі, інтегруючись у численні глобальні економічні ланцюжки, саме рідкоземельні елементи відкривають цілий спектр нових можливостей.

У рамках дослідження проаналізовано й узагальнено інформацію щодо основних напрямків використання рідкоземельних елементів, кон'юнктури їх ринку, існуючої та прогнозованої динаміки цін; проведено систематизацію стимулювальних та стримувальних факторів розвитку мінерально-сировинної бази рідкоземельних елементів за економічними, екологічними, геологічними, ресурсними та технологічними показниками; простежено зв'язок сучасної світової стратегії "зеленої енергетики" із темпами інтенсифікації робіт на об'єктах потенційного видобутку рідкоземельних елементів у світі та наведено аргументацію відносно першочергової необхідності концентрування зусиль на поповненні ринку елементів церієвої групи, куди входять неодим й празеодим.

За результатами проведеного дослідження зроблено висновок щодо головних факторів розвитку ринку рідкоземельних елементів, а також ідентифіковано найбільш перспективні для геологічних пошуків та реалізації видобутку ділянки на території України.

Ключові слова: рідкоземельні елементи, попит, зелена енергетика, розвіданість об'єктів, промислова цінність.

Вступ

Унікальна здатність рідкоземельних елементів (РЗЕ) інтегруватися у велику кількість глобальних економічних ланцюжків, стаючи невід'ємною частиною широкого кола технологічних галузей, виводить їх статус на рівень стратегічної сировини у будь-якій розвиненій країні.

Інноваційними підходами до розв'язання старих проблем з метою забезпечення всіх потреб сучасного суспільства був утворений широкомасштабний спектр можливого використання РЗЕ, який варіюється від щоденного (засоби для полірування скла, автомобільні генератори та ін.) до високотехнологічного спеціалізованого застосування (лазери, магніти, акумулятори, волоконно-оптичні телекомунікаційні кабелі та ін.). Окрім того, стратегічне значення РЗЕ зумовлюється можливістю їх використання у безпековій (військовій) сфері, заправляючи відповідні технології у процесах створення військової техніки (підводний човен американського класу Вірджинія, есмінець класу Arleigh Burke, літак-вишуквач F-35).

Отже, рідкоземельні елементи були трансформовані в універсальний компонент технічної еволюції країн, що, у свою чергу, відіграє ключову роль у забезпеченні конкурентоздатності їх економік. Із цієї причини надійний доступ до якісних ресурсів відповідної сировини нині входить до пріоритетів кожної держави.

Аналітичний огляд основних напрямків використання РЗЕ. Перші два десятиріччя XXI ст. можна вважати суттєвою віхою в історії розвитку високотехнологічного сектору промисловості, і важливу роль у цьому відіграли саме рідкоземельні елементи, відкривши цілий спектр можливостей для реалізації найбільш сміливих проєктів. Як закономірний результат – даний тип сировини було переведено в категорію стратегічно важливих (Critical Mineral) для більшості розвинених країн, та почало фіксуватися стрімке підвищення попиту на неї. Нині

ця світова тенденція залишається перспективною в майбутньому.

РЗЕ є невід'ємною частиною багатьох промислових, комерційних і побутових приладів, важливим елементом електрифікаційних процесів і транспортних засобів, що зайняли міцні позиції у нашому повсякденному житті. Вони містяться в кожному телефоні, машині, літаку, без них неможливе створення вітрових турбін та ряду військової техніки. Сучасними науковими дослідженнями була встановлена можливість за допомогою їх використання підвищувати корозійну стійкість легких сплавів, поліпшувати структури та механічні властивості чавунів, сталей, магнію та алюмінію. РЗЕ використовують у атомних батареях, що здатні виділяти енергію протягом кількох років, а сплави з таких елементів, як церій, плутоній і торій, використовуються як ядерне паливо. Окрім того, до переліку найпоширеніших напрямків використання даної сировини (рис. 1) входять виробництво акумуляторних батарей та оптична промисловість (Маланчук, 2016; Goodenough, Wall, & Merriman, 2017; Minerals Yearbook..., 2016; Roskill, 2016b).

Згідно з проведеною диференціацією рідкоземельних елементів щодо основних напрямків їх застосування (табл. 1), найширший їх спектр може використовуватися у процесах виготовлення лазерів різних типів, люмінофорів, магнітів, сплавів та каталізаторів для нафтової промисловості. Для решти сфер, з метою отримання якісного результату, можливим є використання більш обмеженого кола РЗЕ.

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими практичними завданнями. Важливою особливістю рідкоземельної сировини є складність її заміни, оскільки, незважаючи на невеликий обсяг її можливого використання, вона здатна забезпечити продукту такі переваги, як продуктивність або довговічність (Smith Stegen, 2015). Даний аспект є свідченням безсумнівного економічного

© Курило Марія, Кошарна Софія, 2024

пріоритету широкомасштабного використання РЗЕ в сучасному світі та аргументованим доказом потреби розвитку їх мінерально-сировинної бази. Останнє значною мірою залежить не лише від ступеня промислового освоєння та наявності можливостей довивчення родовищ і

рудопроаяів, але й від обізнаності з питань, що стосуються кон'юнктури самого ринку цієї сировини, динаміки та прогнозів її цін, шляхів реалізації тощо. Тобто всіх факторів, що можуть вплинути на прийняття остаточного інвестиційного рішення.

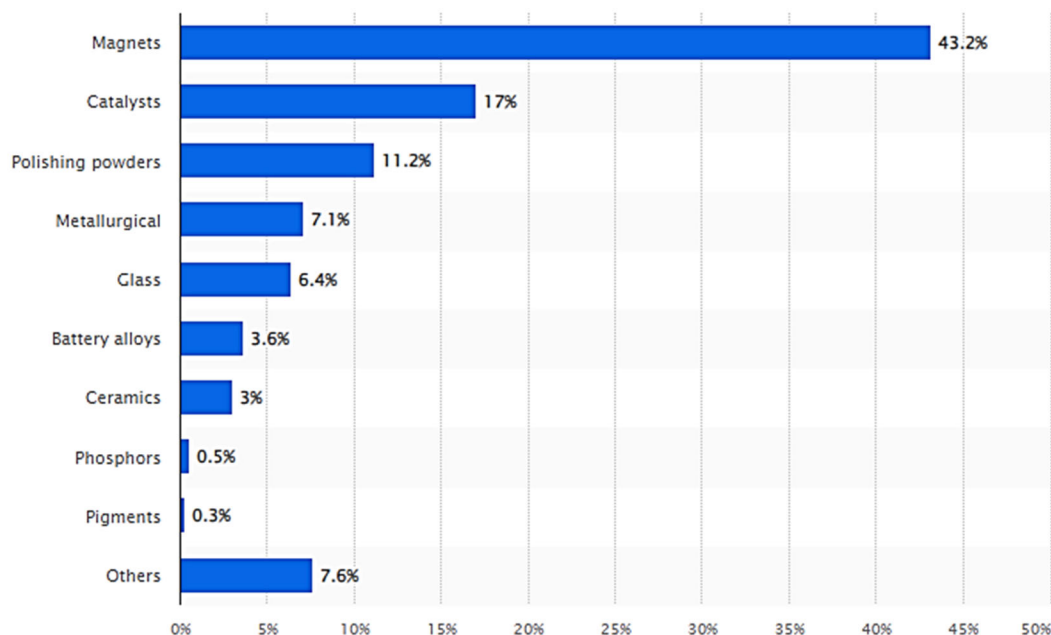


Рис. 1. Поточне використання РЗЕ у світі (Distribution of rare..., 2021)

Таблиця 1

Основні напрямки застосування РЗЕ	
Напрямки застосування	РЗЕ
Лазери	Y, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb
Люмінофори (для мобільних телефонів, LEDs та інших пристроїв)	Sc, Y, Eu, Yb, La, Dy, Ce, Pr, Lu
Виробництво магнітів	Nd, Pr, Sm, Tb, Dy, Ho
Каталізatori в нафтовій промисловості	La, Ce, Nd, Pr, Lu
Виробництво сплавів	Sc, Yb, Er, Dy, Tb
LaNiH акумулятори	La, Ce, Nd, Pr
Прозорість скла	Ce, La, Nd, Er
Оптоволокно	Er, Y, Tb, Eu
Полірувальні матеріали для моніторів, планшетів, телевізорів, дзеркала (у вигляді наночастинок)	La, Ce, Nd
Автокаталізatori	La, Ce, Nd
Кераміка	Nd

Формулювання цілей статті. Наявні публікації результатів раніше проведених робіт та статистичних даних покладено в основу даного дослідження, яке стосується систематизації стимулювальних та стримувальних факторів розвитку мінерально-сировинної бази РЗЕ. Вся інформація, по якій існують відкриті опубліковані дані, систематизована за економічними, екологічними, геологічними, ресурсними та технологічними показниками. Окремим завданням було виділити на основі отриманих результатів перспективні комплексні об'єкти на території України, що можуть бути охарактеризовані як ті, що мають високу промислову цінність та вбачаються інвестиційно привабливими в умовах сучасних реалій.

Результати

У світовому виробництві РЗЕ уже досить тривалий час (з 1990-х років), провідні позиції займає Китай, виробляючи близько 95 % їх світових обсягів. Ключовим поясненням такого незмінного лідерства є можливості цієї країни з переробки значного відсотка рідкісних земель, що видобуваються й в інших частинах Азії, та тих невеликих кількостей, що надходять з Африки. Окрім того,

технічна розвиненість Китаю дає йому змогу брати у розробку та реалізацію проекти, пов'язані з переробкою важких рідкоземельних концентратів з нафтопереробних заводів, суттєво збільшуючи тим самим свою імпорتنу спроможність (у 2018 р. обсяги імпорту сягали 13 000 т).

Фактична монополія Китаю останніми роками викликає дедалі глибшу стурбованість у світового суспільства й після введення Китаєм експортних квот, що призвело до значного зростання цін на РЗЕ, у 2010 р. у всьому світі спостерігалось різке зростання інтересу до рідкісних земель, що супроводжувалося інтенсифікацією розвідки родовищ та активізацією пошуків можливих альтернатив, оскільки збільшення попиту на цей вид сировини (рис. 2) стрімко підвищується.

Підходи до вирішення даного питання різняться – Японія сконцентрувалася на пошуку заміників РЗЕ, Австралія – на стійкому розвитку гірничодобувної діяльності, а Канада – на пошуках та розвідці (Nicoletopoulos, 2014). Так чи інакше, дані роботи суттєво сприяють підвищенню рівня розвіданості надр (рис. 3) та окреслюють можливі перспективи.

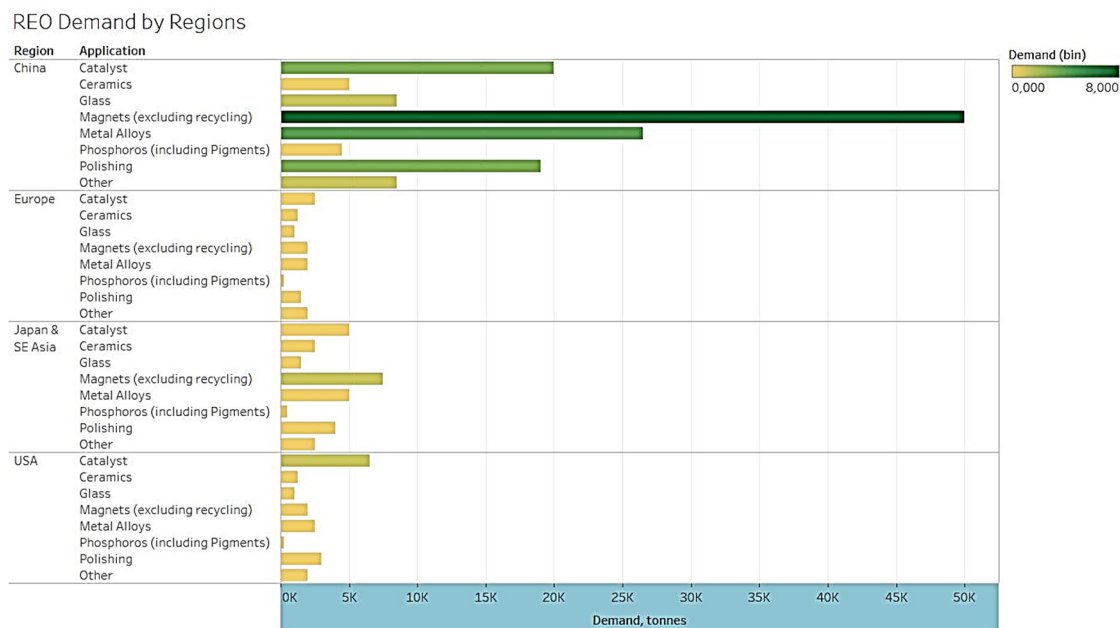


Рис. 2. Регіональна диференціація потреби в РЗЕ (USGS, н.д.)

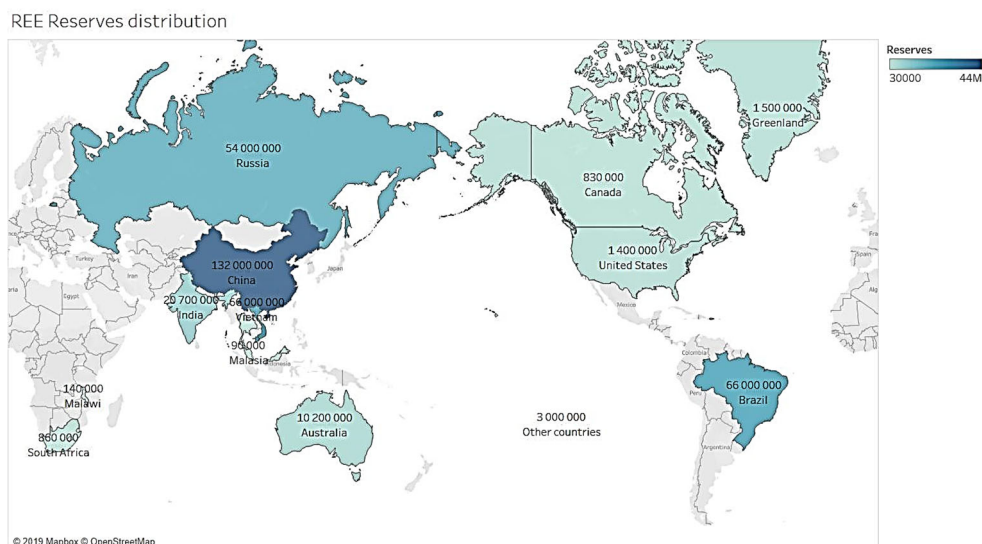


Рис. 3. Розподіл запасів РЗЕ (Візуалізація даних виконувалась за використання академічної ліцензії IBM Tableau у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Україна)

Високий попит на рідкоземельні елементи, створений широким спектром можливостей їх використання, водночас супроводжується рядом перепон, подолання яких є наріжним питанням подальшого розвитку напруму.

Одним із головних факторів, що часто унеможлиблює відкриття рідкоземельних виробництв у районах із високим технологічним рівнем інфраструктури є *жорсткі екологічні вимоги* в розвинених країнах, зокрема Європи. Їх небажання такого сусідства змушує переміщувати виробничі потужності до менш розвинених територій. Яскравим прикладом може слугувати розміщення найбільших заводів австралійської компанії "Lynas" у Малайзії, де екологічні обмеження є більш пластичними, і водночас є більше простору для виробничих маневрів (Dadwal, 2011). З огляду на ці обставини, перед компаніями постають питання провадження високоякісного менеджменту проєктів щодо рідкоземельних елементів, кожен з яких потребує не одного року роботи, сповільнюючи тим

самим можливими темпами зростання продуктивності досліджуваного аспекту галузі.

Іншим фактором, що має вплив на реалізацію нових проєктів і, відповідно, підвищення рівня конкуренції на ринку рідкоземельних елементів, що могли б знизити ризики поставок, є *високі затрати на освоєння нових родовищ*. Це зумовлено їх високою розрізненістю за складом і базовими мінералами, з яких вилучають РЗЕ. І дуже часто виникає потреба в індивідуальному підході / технології до відпрацювання об'єкта.

Вплив стратегії "зеленої енергетики" та її реалізації на ринок РЗЕ. На противагу зазначеним складнощам облаштування рідкоземельного виробництва у світі проводиться активна популяризація ідеї впровадження стратегії "зеленої енергетики", що ґрунтується на зменшенні кількості викидів (Low Emission Development Strategy, 2010) та використанні чистих енергетичних технологій, вагомий відсоток виробництва яких становить саме РЗЕ. Збільшення з кожним роком

попиту на цю сировину є неминуче з огляду на необхідність її застосування у вітроенергетиці, переробці нафти, забезпеченні населення високоефективним освітленням, розробці транспортних засобів нового покоління – тобто всіх сферах, націлених на енергозбереження, розвиток низьковуглецевої економіки та зменшення викидів вуглецю в атмосферу (Стратегія..., н.д.).

Особливий інтерес протягом наступного десятиліття будуть становити такі елементи, як неодим, празеодим, диспрозій, лантан та церій. Попит на перші три елементи зумовлюється можливістю отримання дуже потужних і постійних (перманентних) неодимових магнітів, які виступають важливим компонентом конструювання гібридного транспорту, електромобілів і вітроенергетичних турбін.

Осучаснення підходів до вітроенергетики супроводжується впровадженням більших та потужніших турбін, до складу інженерної конструкції яких входять саме неодимові магніти, що здатні суттєво зменшувати розмір і вагу генератора. З тих же причин на ринку електромобілів (як звичайних, так і гібридних) почало відмічатися

домінування продукції з двигунами, сконструйованими за аналогічним принципом. Даний підхід вбачається перспективним, з огляду на можливість обмежувати згадані вище параметри відповідно до сучасних конструктивних рішень та конфігурацій транспорту (Critical Materials Strategy, 2011; Market information, н.д.).

Лантан та церій, у свою чергу, можуть бути використані в автокаталізаторах і як добавки флюїдного каталітичного крекінгу, трансформуючи важкі молекули в більш легкі сполуки та зменшуючи викиди, спричинені переробкою сирової нафти. А модернізація технологій якісного освітлення припускає доповнення виробничого процесу такими елементами, як ітрій, прометій, європій, тебрій та диспрозій.

З огляду на все вищезазначене, "зелена енергетика" слугує для сучасного світу рушійною силою, завдяки якій очікується інтенсифікація темпів розвитку технологій різної направленості, що можуть привести до подвоєння попиту на РЗЕ до 2025 р. (рис. 4).

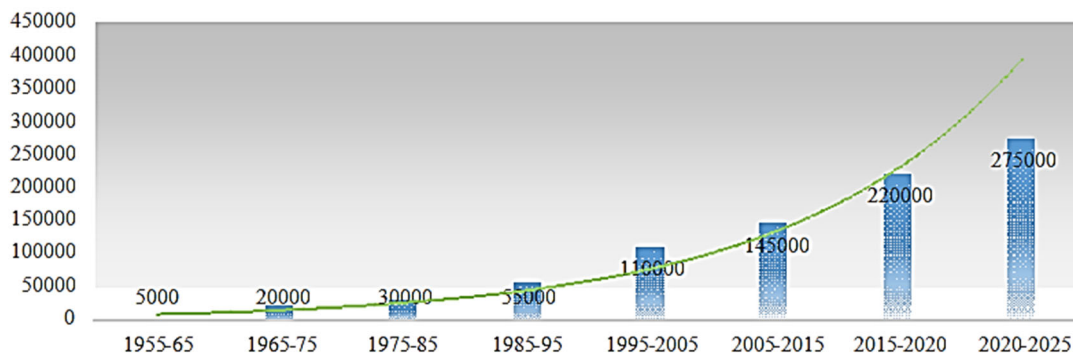


Рис. 4. Попит на РЗЕ ($\pm 15-25\%$) тонн за прогнозами Rare Earth Industry Association

За оцінками Rare Earth Industry Association серед оксидів РЗЕ саме ринок елементів церієвої групи (куди входять неодим і празеодим) є сьогодні найбільш

ненасиченим (відсоток пропозиції на світовому ринку є невисоким) (рис. 5), незважаючи на його високу затребуваність (табл. 2).

Major REE Mine Producer - 2017

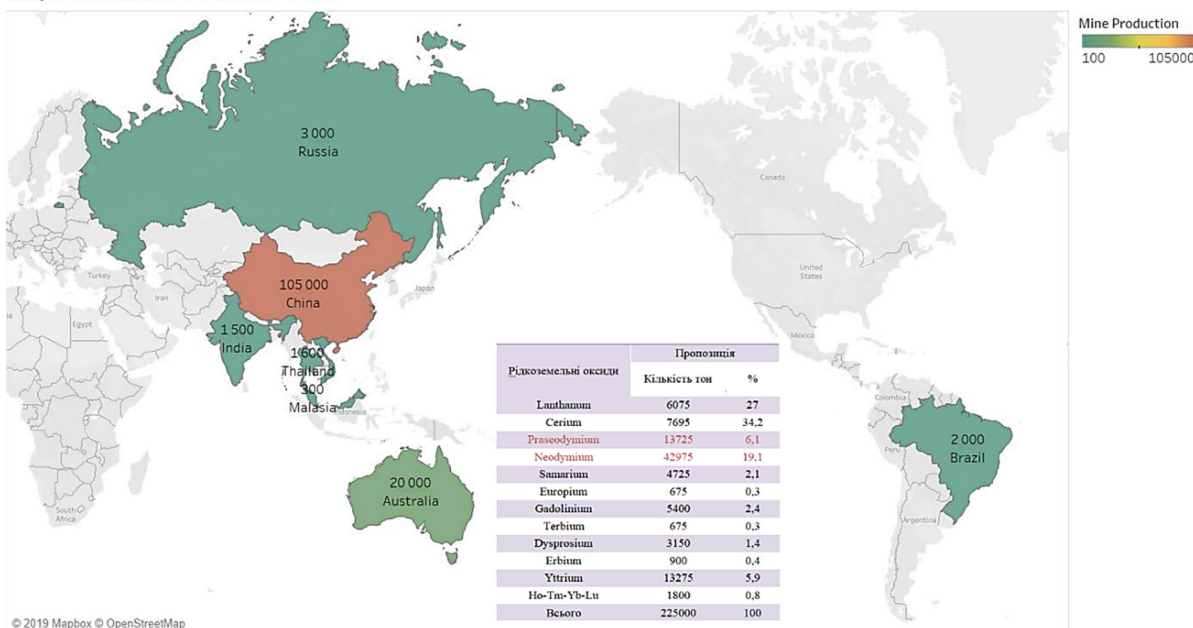


Рис. 5. Світова пропозиція для окремих рідкоземельних елементів в 2020 році ($\pm 25\%$) (візуалізація даних виконувалась за використання академічної ліцензії IBM Tableau у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Україна)

Таблиця 2
Світовий попит для окремих рідкоземельних елементів в 2020 році ($\pm 25\%$)

Рідкоземельні оксиди	Попит	
	Кількість тонн	%
Lanthanum	49425	24,50
Cerium	72175	35,80
Praseodymium	15175	7,50
Neodymium	46100	22,90
Samarium	1600	0,80
Europium	250	0,10
Gadolinium	3675	1,80
Terbium	400	0,20
Dysprosium	1850	0,90
Erbium	900	0,40
Yttrium	9675	4,80
Ho-Tm-Yb-Lu	275	0,1
Всього	201500	100

Згідно з аналітичними викладками Roksil за найближчі кілька років (до 2026 р.) є ймовірність деякої зміни попиту (рис. 6) на РЗЕ, як з погляду обсягу, так і питомого споживання окремих елементів, що буде зумовлено розробкою нових продуктів і черговим витком технологічного розвитку країн.

Відповідно до даного прогнозу, до головних факторів розвитку ринку РЗЕ можна віднести не лише економіко-політичні маніпулювання провідного виробника, але й розширення переліку сфер, що збільшуватимуть попит і, відповідно, й ціну. Так, за прогнозами Rare Earth Industry Association ціни на даний вид сировини, зокрема на оксид неодиму (рис. 8), у найближчі роки буде невпинно зростати.

Динаміку цін на оксиди РЗЕ, за даними китайських трейдерів (<https://giti.sg>), наведено в табл. 3.

У той же час, згідно зі **Statista Global Consumer Survey**, деякі коливання цін будуть фіксуватися відносно інших, дещо менш затребуваних оксидів РЗЕ (рис. 7, 8), що може спровокувати більш активні пошуки розширення кола саме їх використання.

Враховуючи вищезгадане зростання цін на РЗЕ та безсумнівний економічний пріоритет широкомасштабного використання цієї сировини в сучасному світі, суттєві перспективи для України можуть відкрити саме активні пошукові та розвідувальні роботи, зокрема в межах Українського щита, де зосереджений основний відсоток запасів руд (табл. 4), що містять РЗЕ.

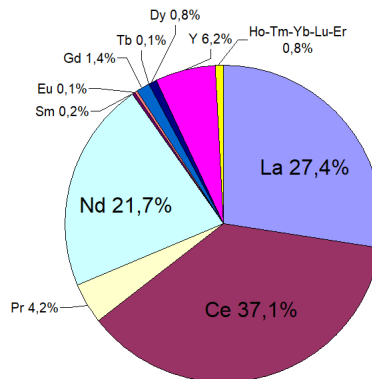


Рис. 6. Прогноз попиту для окремих рідкоземельних елементів у 2026 році

Таблиця 3
Динаміка цін на оксиди РЗЕ в 2021–2022 роках

	2021 \$/kg	2022 \$/kg	Δ \$/kg
Praesodymium oxide	80,04	129,8	49,76
Neodymium oxide	103,89	129,8	25,91
Erbium oxide	31,55	50,07	18,52
Gadolinium oxide	37,79	64,09	26,3
Yttrium oxide	6,54	11,05	4,51
Cerium oxide	1,42	1,15	–0,27
Lanthanum oxide	1,35	1,13	–0,22
Samarium oxide	2,08	3,19	1,11
Terbium oxide	1516,08	2054	537,92
Dysprosium oxide	460,21	348,6	–111,61
Europium oxide	30,01	28,48	–1,53
Holmium oxide	157,77	162,44	4,67

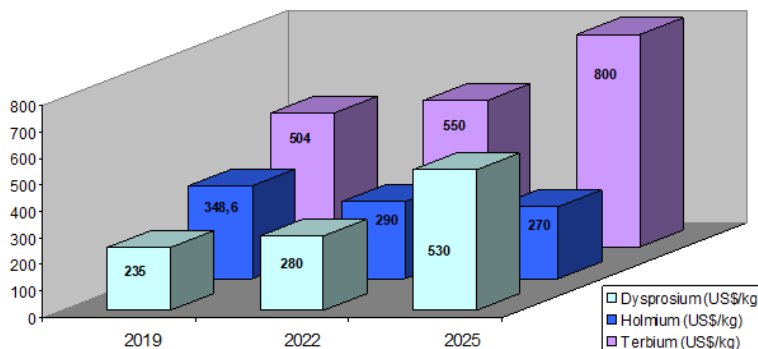


Рис. 7. Прогноз цін на РЗЕ (Dy, Ho, Tb) за прогнозами Statista Global Consumer Survey

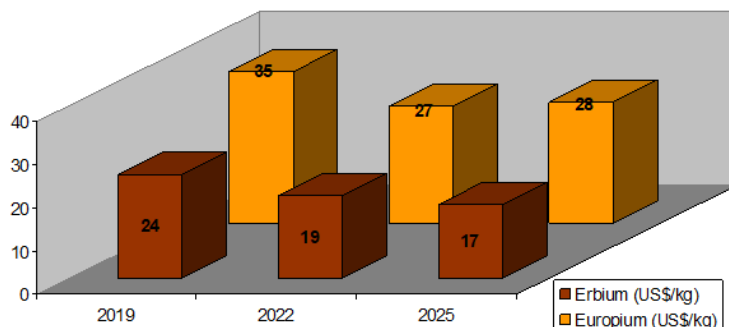


Рис. 8. Прогноз цін на РЗЕ (Er, Eu) за прогнозами Statista Global Consumer Survey

Таблиця 4

Розподіл запасів рідкісноземельних руд (Мінеральні ресурси України, 2021)

Назва області	Кількість родовищ	Запаси на 01.01.2021**	
	Всього	Всього	
		A+B+C ₁	C ₂
Всього в Україні	1+2*	860524,0 1939,74	741358,0 291,66
Донецька	1*	–	635222,0 0
Запорізька	1*	859627,0 1938,0	95858,0 274,0
Житомирська	1	897,0 1,74	10278,0 17,66

Примітки: *об'єкти обліку запасів, що входять до складу комплексних родовищ; ** $\frac{\text{руда, тис.т}}{\text{PЗЕ}(\text{TR}_2\text{O}_3), \text{ тис.т}}$

У Державному балансі запасів корисних копалин враховуються запаси рідкісних земель по таких родовищах, як *Новополтавське*, *Яструбецьке* (ділянка Південно-Західна). Проте, враховуючи усе зазначене вище, сучасний ступінь розвіданості, а також проведений раніше (Михайлов, Курило, & Кошарна, 2021) аналіз потенційної промислової цінності відомих об'єктів, нині є можливим виокремлення з-поміж інших ряду додаткових комплексних об'єктів, що вбачаються інвестиційно привабливими для інтенсифікації подальшого освоєння.

До зазначеного переліку найперспективніших увійшли:

- *Анадольське родовище* – представлене рудною зоною, що перетинає анадольські граніти і метаморфічні породи західноприазовської серії на південний схід від Жовтневого масиву. Рідкоземельні мінерали представлені ортитом, церитом, цербастнезитом, апатитом і флюоритом. Ортит утворює гнізда й лінзи (до 10–15 см) снопо- і в'ялоподібних агрегатів видовжених призматичних кристалів (0,5–1,5 мм), містить 23,7 % TR_2O_3 . Церит утворює вкраплення дрібних ксеноморфних і ізометричних зерен (0,5–2 мм) серед агрегатів ортиту, включення у флюориті, містить 70,1 % TR_2O_3 . Бастнезит приурочений до міжзернових ділянок ортиту і заміщує останній. Вміст TR_2O_3 в бастнезиті – 60 %. Апатит і флюорит (2,9 і 0,8–1,12 TR_2O_3 %, відповідно) утворюють у смужчатих рудах тонкі прошарки, які чергуються з прошарками ортиту, за хімічним складом належать до церієвих різновидів апатиту і флюориту. Запаси руди родовища значні, її промислові дослідження на Придніпровському хімзаводі дали позитивні результати;

- *група рудопроявів Балка Корабельна*, яка пов'язана з калієвим метасоматозом. Головні рудні мінерали представлені монацитом і ксенотимом, менше – апатитом і уранінітом. Основна маса рідкоземельних фосфатів у рудних тілах приурочена до ділянок біотитової породи, яка зазнала мікроклінізації. Група відзначається високими якісними параметрами, але потребує довищення і підрахунку запасів із технологічним і гірничо-технічним обґрунтуванням кондицій;

- *Азовське родовище*, що приурочене до серії сієнітових штоків, в якому запаси руд рідкісноземельних металів як супутнього компоненту виявлені в корі вивітрювання, корінних апатитових та рідкіснометалічно-apatитових рудах. Вміст PЗЕ в рудах зазвичай становить перші відсотки, іноді сягаючи 20–30 %, а вміст Zr коливається від 0,02 до 27 %. Середній вміст TR_2O_3 – 1,27, ZrO_2 – 1,5 %;

- інтерес також становлять *розсили приазовського району*, зокрема: Мало-Янисольська, Темрюцька та Василівська ділянки, що зумовлюється встановленими

суттєвими вмістами TREO, та Стародубівський, Діанівський, Жоголівський, Гурівський рудопрояви рідкісних земель, що були виділені ревізійними роботами щодо оцінки рідкісноземельних об'єктів у кінці минулого десятиліття й потребують повторного, досконалішого вивчення, оскільки ймовірність виявлення значних нерозкритих ресурсів велика. А з розвитком технологічних підходів до переробки руди додаткові родовища можуть посприяти значним економічним досягненням.

Дискусія і висновки

Наявність в Україні джерел унікальних корисних копалин є очевидним шансом країни сформувати потужний високотехнологічний сегмент на основі "природних" умов і передумов. Критична оцінка економічного, екологічного, геологічного і ресурсного аспектів є першоосновою для вироблення якісної стратегії та чіткої програми розвитку даного напрямку. Використовуючи знання, вміння і навички, накопичені у сфері створення високотехнологічної продукції, перед Україною відкриваються можливості створення сукупності унікальних напрямків розвитку вітчизняної економіки на основі використання рідкоземельних елементів і металів, що в сучасних умовах є реальним шансом подолання економічної та післявоєнної кризи.

Внесок авторів: Марія Курило – концептуалізація, методологія, валідація даних, написання (перегляд і редагування); Софія Кошарна – формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка).

Список використаних джерел

- Маланчук, З. Р. (2016). Сучасні напрямки використання та переробки техногенних родовищ фосфоритів. *Вісник НУВГП. Серія "Технічні науки"*, 2(74), 133–139.
- Михайлов, В. А., Курило, М. М., & Кошарна, С. К. (2021). Геолого-промислова оцінка та ранжування перспективних об'єктів вітчизняної бази рідкісноземельних елементів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 93(2), 32–40.
- Мінеральні ресурси України (2021). Щорічник. Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України".
- Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року. (н.д.). https://mepr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf
- Critical Materials Strategy (2011) U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf
- Dadwal, S. (2011) The Sino-Japanese Rare Earths Row: Will China's Loss be India's Gain? *Strategic Analysis*, 35(2).
- Distribution of rare earth element consumption worldwide in 2021, by end use (2021). <https://www.statista.com/statistics/604190/distribution-of-rare-earth-element-consumption-worldwide-by-end-use/>
- Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2017). The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. *Natural Resources Research*. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>
- Low Emission Development Strategies (LEDS) (2010). International Energy Agency. <https://www.oecd.org/environment/cc/46553489.pdf>
- Market information. Rare Earth and Steel. (н.д.). https://giti.sg/markets/markets_files/Updated_RE_prices.html

Minerals Yearbook. Rare Earths. (2016). U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. (н.д.). <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-raree.pdf>

Nicoletopoulos, V. (2014) European Policies on Critical Materials, Including REE. ERES2014:1st European Rare Earth Resources Conference. Milos. 04–09.09.2014. <http://www.eurare.eu/docs/eres2014/fourthSession/VasiliiNicoletopoulos.pdf>

Roskill. (2016b). Rare earths: Global industry, markets and out-look (16th ed.). Roskill.

Smith Stegen, K. (2015). Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. Energy Policy, 79, 1–8

United States Geological Survey (н.д.). <https://www.usgs.gov/>

References

Critical Materials Strategy (2011) U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf

Dadwal, S. (2011) The Sino-Japanese Rare Earths Row: Will China's Loss be India's Gain? *Strategic Analysis*, 35(2).

Distribution of rare earth element consumption worldwide in 2021, by end use (2021). <https://www.statista.com/statistics/604190/distribution-of-rare-earth-element-consumption-worldwide-by-end-use/>

Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2017). The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. *Natural Resources Research*. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>

Low Emission Development Strategies (LEDS) (2010). International Energy Agency. <https://www.oecd.org/environment/cc/46553489.pdf>

Malanchuk, Z. (2016). Current trends of technogenic phosphogypsum fields use and recycling. NUoWEE Bulletin. *Technical sciences*, 74(2), 133–139 [in Ukrainian].

Market information. Rare Earth and Steel. (н.д.). https://giti.sg/markets/markets_files/Updated_RE_prices.html

Mineral resources of Ukraine (2021). Yearbook. State Research and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine" [in Ukrainian].

Minerals Yearbook. Rare Earths. (2016). U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. (н.д.). <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/myb1-2016-raree.pdf>

Mykhailov, V., Kurilo, M., & Kosharna, S. (2021) Geological industrial assessment and ranking of promising objects of the domestic base of rare earth elements. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 93(2), 32–40 [in Ukrainian].

Nicoletopoulos, V. (2014) European Policies on Critical Materials, Including REE. ERES2014:1st European Rare Earth Resources Conference. Milos. 04–09.09.2014. URL: <http://www.eurare.eu/docs/eres2014/fourthSession/VasiliiNicoletopoulos.pdf>

Roskill. (2016b). Rare earths: Global industry, markets and out-look (16th ed.). Roskill.

Smith Stegen, K. (2015). Heavy rare earths, permanent magnets, and renewable energies: An imminent crisis. Energy Policy, 79, 1–8

Ukraine 2050 Low Emission Development Strategy. (н.д.). https://mepr.gov.ua/files/docs/Proekt/LEDS_ua_last.pdf [in Ukrainian].

United States Geological Survey (н.д.). <https://www.usgs.gov/>

Отримано редакцією журналу / Received: 19.05.23

Прорецензовано / Revised: 30.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Mariia KURYLO, DSc (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-1411-2754

e-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Sofia KOSHARNA, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-4523-1086

e-mail: sofia.kosharna@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

STRATEGIC IMPORTANCE OF RARE EARTH ELEMENTS FOR MODERN TECHNOLOGIES AND PROSPECTS OF DOMESTIC DEPOSITS

In the context of sustainable development, the reorientation of a wide range of technological industries is an inevitable phenomenon that predetermines the perturbations of the established list of raw materials of strategic importance. Changes in priorities are primarily derived from the transition need to innovative approaches in order to solve old problems and ensure all the needs of modern society. So far, integrating into numerous global economic chains, rare earth elements open up a whole range of new opportunities.

Within the study information on the main areas of REE use, its market conditions, existing and projected price dynamics were analyzed and summarized; a systematization of stimulating and restraining factors of REE mineral resource base development according to economic, ecological, geological, resource and technological indicators was also made; the connection of the modern "Green Energy Transition" global strategy with the work intensification rate at potential REE mining objects is traced, arguments regarding the primary need to concentrate efforts on replenishing the market for elements of the cerium group, which includes neodymium and praseodymium are given as well.

Based on the results of the study, a conclusion regarding the main factors in the development of the REE market was made, and the most promising areas for geological prospecting and mining implementation on the territory of Ukraine were identified.

Keywords: rare earth elements, demand, green energy, exploration level of objects, industrial value.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК [551.242.1.03+622.831.1](477.6)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.09>

Олександр НІКІТЕНКО, асп., провід. геолог
ORCID ID: 0000-0001-7911-0760
e-mail: paleontologist78@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
ТОВ "Бренд-Вік ЛТД", Київ, Україна

ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ ТА ГЕОЛОГІЧНА СТРУКТУРА ЗАХІДНОГО ЗАМИКАННЯ ГОРЛІВСЬКОЇ АНТИКЛІНАЛІ ДОНБАСУ ЧАСТИНА 2. ПОЛЯ НАПРУЖЕНЬ І ДЕФОРМАЦІЙ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)

Вступ. Горлівська антикліналь Донбасу як об'єкт тектонофізичних досліджень становить інтерес не тільки з позиції геологічної будови, механізму формування і просторового розташування тектонічних дислокацій, але й з позиції впливу цих чинників на умови розробки вугільних родовищ. Метою цього дослідження є аналіз геологічної будови, полів напружень і деформацій західного замикання Горлівської антикліналі для прогнозування гірничо-геологічних умов проведення гірничих робіт.

Методи. Реконструкція полів тектонічних напружень виконувалася за всією сукупністю орієнтирних і кінематичних даних з використанням кінематичного методу Гуценка, який ґрунтується на аналізі векторів тектонічних зміщень по дзеркалах ковзання. Параметри полів напружень мезорегіонального рівня реконструйовано шляхом статистичного опрацювання локальних стереографічних розв'язань. Відносну вікову хронологію і стадійність тектонічних напружень було визначено за допомогою методу стрес-моніторингу. Параметри головних осей сумарного поля деформацій оброблено за допомогою програмного забезпечення GEOS.

Результати. Реконструйоване поле тектонічних напружень характеризується субгоризонтальною віссю максимальних головних напружень, орієнтованою з північного заходу на південний схід, і субгоризонтальною віссю мінімальних головних напружень, орієнтованою з північного сходу на південний захід (зсувне поле). За часом свого прояву такий тип поля напружень ототожнюється з альпійським тектогенезом і є наймолодшим для Донецького басейну. Еволюція умов тектонічного навантаження досліджуваної структури характеризується деформаційним рядом з шести напружених станів – від найдавнішого скидового до наймолодшого зсувного, останній з яких за своїми параметрами синхронізується з наймолодшим, реконструйованим для Донбасу і Приазов'я альпійським полем напружень. Вісь видовження еліпсоїда деформацій має північно-західну – меридіональну орієнтацію, вісь укорочення – північно-східну, майже ортогональну до осі антикліналі. На більшій частині досліджуваної території процес деформування гірського масиву контролювався переважно зсувним і перехідними скидо- і підкидо-зсувними механізмами. Відповідно до значень коефіцієнта Лодє–Надаї деформації відбувалися за умов, близьких до зсувних.

Висновки. Наведені приклади просторових взаємовідносин реконструйованого поля напружень з набором зазначених деформаційних елементів західного замикання Горлівської антикліналі (система спряжених сколів зсувної зони, брахіантиклінальна складка з насувами у її крилах) дають змогу розглядати останні як елементи структурного парагенезису, утворення якого було спричинене правозсувними горизонтальними переміщеннями вздовж системи поздовжніх зсувів приосьової частини Горлівської антикліналі, а фрагменти взаємної симетричності поля напружень і поля деформацій можуть розглядатися як доказ їх генетичного споріднення.

Ключові слова: геологічна структура, сколові деформації, кінематичні індикатори, поле напружень, поле сумарних крихких деформацій, кінематичний метод, коефіцієнт Лодє–Надаї.

Вступ

Одним з ефективних напрямів досліджень, що дають змогу оцінити напрями активних тектонічних зусиль, що сформували геологічну структуру, поля напружень, які існували під час її формування, і розподіл деформацій усередині неї є тектонофізичні дослідження, загальна задача яких полягає у визначенні закономірностей розподілу напружень і розвитку тектонічних деформацій, що виникають у земній корі. Дані польової тектонофізики можуть вносити істотні доповнення до результатів різних видів моделювання, які у теперішній час широко використовуються для розв'язання таких задач. Сприятливі умови для таких спостережень створюються під час кар'єрної і підземної розробки пластових родовищ, коли здійснюється суцільна виїмка корисних копалин з детальним геологічним документуванням, завдяки чому можна безпосередньо вивчати геологічні структури різного рівня в реальному масштабі і фіксувати зміни морфології по площі і в розрізі.

Аналіз попередніх досліджень. Реконструкціям полів напружень і механізму утворення західної частини Горлівської антикліналі Донбасу присвячені дослідження А.А. Бабиця, Ю.В. Буцика, А.М. Добрянського, В.С. Ємця, В.О. Корчемагіна, В.Ф. Приходченка, Ю.С. Рябоштан, В.С. Токовенка. Особливості просторового орієнтування осей головних нормальних напружень вказують на те, що

вони є наслідком стискання, напрямом якого спочатку був поперечним до шарніру Горлівської антикліналі, а потім діагональним до нього. Формування Горлівської антикліналі і деформаційних елементів, які ускладнюють її структуру, зокрема різнорангових розривів і складок другого порядку, відбувалося у два етапи: перший, власноскладчастий, який пов'язується із заключними фазами герцинського орогенезу, і другий, післяскладчастий, пов'язаний із заключними фазами альпійського орогенезу. Так, просторове співвідношення напрямку дії головних нормальних напружень з деформаційними елементами Микитівського рудного поля визначається діагональним положенням осей цього поля до деформаційних осей головної рудокоонтролюючої структури (Горлівської антикліналі) і симетричним – до складчастих структур другого порядку склепіння головної структури: близгоризонтальні осі максимального (σ_3) і мінімального (σ_1) стискання орієнтовані впоперек простягання купольних складок і паралельно положенню їх шарнірів відповідно. За значеннями коефіцієнта Лодє–Надаї (μ_0) напружений стан гірських порід варіював у широких межах від одновісного стиснення до одновісного розтягування. Це поле напружень є наймолодшим для Донбасу і датується ларамійською фазою альпійського тектогенезу (Гинтов, 2005; Корчемагин, 1970; Корчемагин, & Емец, 1987; Корчемагин, & Рябоштан, 1987; Корчемагин і др., 2005; Saintot et al., 2013; Sim et al., 1999). З урахуванням

реконструйованих параметрів полів напружень, кінематики розривів і орієнтування структурних деформаційних елементів було наведено механізм структуроутворення Головної антикліналі Донбасу як надрозломної складки, який передбачає, що структура склепіння Горлівської антикліналі і Микитівського рудного поля була сформована у результаті правобічних зсувних поздовжньо-зональних рухів по зоні Центральнодонецького глибинного розлому, де всі відомі деформаційні елементи рудного поля являють собою елементи структурного парагенезису правозсувної зони, що сформувалися за один етап за незмінного напрямку осей загального поля напружень (Емец і др., 1986; Корчемагин, 1970, 1984; Корчемагин, & Емец, 1987; Корчемагин, & Рябоштан, 1987; Никольский і др., 1991).

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Геологічна структура західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі на відміну від її крил і склепінної частини залишалася меншою мірою вивченою, проте в міру розвитку гірничих робіт у межах поля шахти "Новодзержинська", розташованої на самому периклінальному замиканні антикліналі, з'явилася можливість провести структурно-тектоніфізичні дослідження, завдяки яким за новими даними про кінематику розривів було здійснено реконструкцію основних параметрів тектонічного поля напружень і поля сумарних крихких деформацій для цієї ділянки Горлівської антикліналі.

Формулювання цілей статті. Основною метою досліджень є вивчення структурно-тектоніфізичних особливостей і закономірностей формування геологічної структури і тектонічних розривів західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі для прогнозу гірничо-геологічних умов розробки вугільних родовищ. Основним завданнями є реконструкція основних параметрів полів деформацій, тектонічних напружень локального і мезорегіонального рівнів.

Методи

Тектонічні напруження вивчалися кінематичним методом О. Гуценка, сутність якого полягає в знаходженні за допомогою різномасштабних тріщин, розломів зі слідами руху блоків такого орієнтування осей поля напружень, за якого найбільша кількість напрямків відносного переміщення блоків відповідатиме певній теоретичній номограмі (Гинтов, 2005). Реконструкції параметрів тектонічних напружень у локальних об'ємах гірського масиву було здійснено з використанням усієї сукупності заміряних тектонічних сколів і встановлених на їх стінках векторів зміщення. Параметри полів мезорегіонального рівня (для окремих блоків і шахтного поля у цілому) відновлювалися як через статистичне оброблення на стереографічній сітці даних локальних реконструкцій, так і аналітично. У цій статті осі головних нормальних напружень – алгебраїчно мінімального стискання (σ_1) будуть далі іменуватися віссю розтягування, алгебраїчно максимального стискання (σ_3) – віссю стискання.

Відносну часову послідовність полів напружень досліджено методом тектонічного стрес-моніторингу. Зважаючи на передумову про безперервність траєкторій головних напружень у часі та просторі й успадкований характер розвитку деформаційного процесу, він забезпечує можливість виділення синхронізованих між собою безперервних рядів тектонічних напружень, де кожен із членів деформаційного ряду описує сукупність різновікових, але однотипних полів напружень в останньому для дослідженого обсягу деформаційному циклі (Гущенко і др., 2001). Характеристики головних осей поля сумарних крихких деформацій було оброблено за допомогою

спеціалізованого програмного забезпечення GEOS. Реконструкція здійснювалася за всією сукупністю заміряних сколових зміщень (з урахуванням їх знаку), об'єднаних у групи спостережень в окремих локальних об'ємах гірського масиву, у створеній рівномірній мережі пунктів спостережень (згладжене поле деформацій).

Результати

Поле напружень. Польові тектонофізичні дослідження тектонічної тріщинуватості і розривів з елементами кінематики на різних ділянках шахтного поля дали змогу реконструювати параметри тектонічних полів напружень більш ніж у 60 локальних об'ємах гірського масиву на різних пластах і горизонтах шахтного поля.

Враховуючи те, що між орієнтуваннями осей напружень локального рівня і осями наступних структурних рівнів існує закономірний зв'язок, зумовлений ієрархічною природою полів напружень, для переходу до полів мезорегіонального рівня було здійснено статистичне оброблення даних про локальні поля напружень. Зведені стереограми були складені для двох структурних блоків і для всієї шахти в цілому. При підсумовуванні орієнтувань осей нормальних напружень у межах блоків формувалися самостійні зони розподілу, причому зона розподілу для осі стискання σ_3 формувалася у периферичних частинах навхрест розташованих північно-західному і південно-східному квадрантах діаграм, тоді як осями розтягування σ_1 підперезалася вся площа двох других квадрантів: північно-східного і південно-західного (рис. 1а-г).

Сумарне поле напружень незначно відрізняється для першого і другого структурних блоків шахтного поля. У другому блоці осі головних нормальних напружень мають такі елементи залягання: вісь σ_1 – аз. пад. $232^\circ \angle 30^\circ$, вісь σ_3 – аз. пад. $140^\circ \angle 5^\circ$, і лежать в усередненій площині нашарування для цього крила (рис. 1в). У східній частині першого блоку осі орієнтовано таким чином: σ_1 – аз. пад. $65^\circ \angle 24^\circ$, σ_3 – аз. пад. $330^\circ \angle 20^\circ$, де вони також лежать близько до усередненої площини нашарування для цього блоку (рис. 1а). У зоні Осьового насуву (західна частина першого блоку) осі мають таке орієнтування: σ_1 – аз. пад. $230^\circ \angle 28^\circ$, σ_3 – аз. пад. $330^\circ \angle 18^\circ$; вісь стискання розташована близько до площини нашарування, а вісь розтягнення лежить у площі Осьового насуву (рис. 1б). Загалом для всього шахтного поля воно характеризується такими параметрами: вісь стискання σ_3 – $141^\circ \angle 5^\circ$, вісь розтягування σ_1 – $231^\circ \angle 20^\circ$; вид напруженого стану близький до чистого зсуву ($\mu_0 = \pm 0$) (рис. 1г) (Павлов, Никитенко, & Ткаченко, 2011; Nikitenko, & Chernysh, 2015; Volkova, Nikitenko, & Chernysh, 2016).

Відновленому полю напружень симетричні основні деформаційні елементи шахтного поля – спряжена пара зсувів (північно-західні праві і південно-східні ліві), що формують зсувну зону, широтні насиви і складчастість другого порядку.

Виходячи з важливої умови застосовності кінематичного методу про те, що штрихи ковзання відображають сліди останніх найбільш молодих тектонічних зміщень (сліди більш ранніх зміщень або стираються, або мають гіршу збереженість), які виникають по розривах під дією єдиного поля напружень, можна припустити, що посування за всією сукупністю розривів було пов'язане з дією зсувного поля напружень і підпорядковано генеральному правозсувному зміщенню породного масиву вздовж осі Горлівської антикліналі по площині основного розриву. Деформування відбувалося як за рахунок зміщень поверненнями тріщин (розривів), що формуються, так і за рахунок

зміщень по вже наявних ослаблених поверхнях різного віку і генезису.

Реконструйоване для західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі поле напружень аналогічне полю, отриманому для Микитівського рудного поля (рис. 2д). Можна стверджувати, що характер поля напружень і тип дислокацій у склепінні Головної антикліналі витримані від східних меж Микитівського рудного поля до західного замикавання Горлівської антикліналі. За часом свого прояву подібний тип поля напружень ототожнюється з ларамійською фазою альпійського тектогенезу (Гинтов, 2005; Корчевагин, & Емец, 1987; Корчевагин, & Рябоштан,

1987; Корчевагин и др., 2005; Гончар, 2019). Відновлене поле напружень і, отже, всі відповідні йому деформації – наймолодші для Донецького басейну.

Еволюція тектонічного поля напружень може бути описана виділеними за процедурами тектонічного стрес-моніторингу просторово-часовим деформаційним рядом з шести однорідноосних напружених станів (фаз деформування) в останньому, наймолодшому для дослідженого об'єму деформаційному циклі – від найдавнішого (F) до наймолодшого (A). Основні параметри виділених фаз деформування наведено в табл. 1.

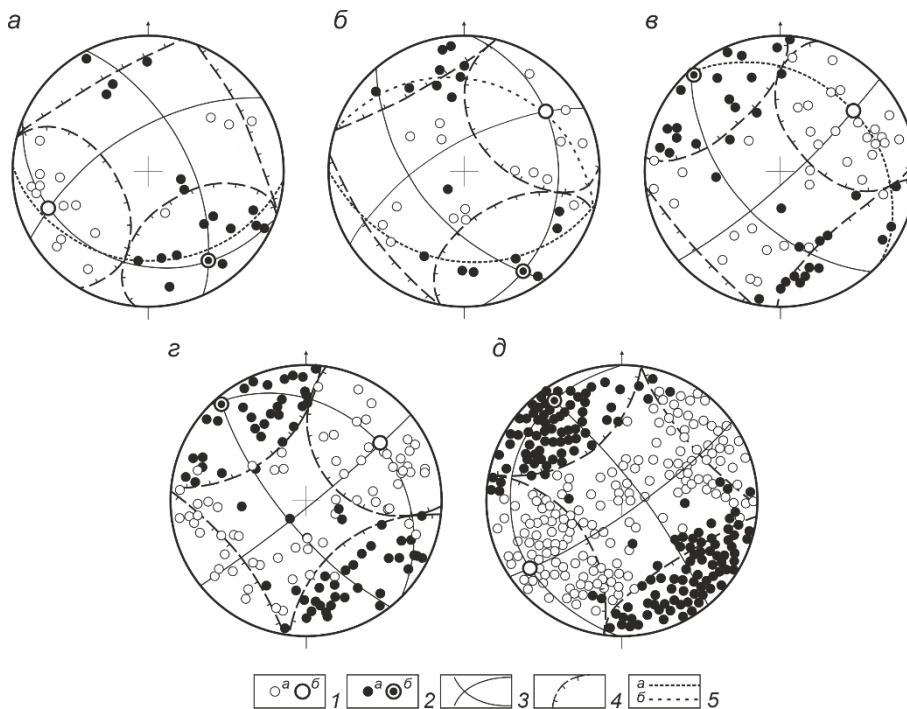


Рис. 1. Реконструкції поля тектонічних напружень для поля шахти "Новодзержинська":
перший блок – зсувна зона (а), зона Осьового насуву (б); в) другий блок; г) шахтне поле; д – Микитівське рудне поле.
1 – осі розтягування: а – локального рівня, б – мезорегіонального; 2 – осі стиснення: а – локального рівня, б – мезорегіонального; 3 – площини дії головних нормальних напружень; 4 – конічні поверхні, що обмежують зони розвитку осей одного знаку; 5 – площини: а – нашарування; б – осьового насуву.

Таблиця 1

Фази деформування і відповідні їм характеристики напружень

Фаза	%	Тип поля	σ_1	σ_2	σ_3	μ_σ	μ_ϵ
A	34,4	зсувний	$257 \angle 3$	$154 \angle 77$	$348 \angle 13$	0,9	0,06
B	25,4	підкидовий	$219 \angle 67$	$79 \angle 18$	$344 \angle 14$	0,95	0,58
C	18,4	підкидовий	$187 \angle 75$	$347 \angle 14$	$78 \angle 5$	0,95	0,31
D	28,1	зсувний	$336 \angle 13$	$178 \angle 76$	$68 \angle 5$	-0,95	-0,11
E	22,8	скидовий	$350 \angle 15$	$260 \angle 1$	$166 \angle 75$	-0,95	-0,43
F	18,7	скидовий	$259 \angle 2$	$350 \angle 15$	$162 \angle 75$	-0,9	-0,44

Примітки: % – питома вага однорідної групи сколів у загальній вихідній генеральній вибірці; тип поля – геометричний тип поля напружень або тип деформаційного режиму (відповідно до величин кутів нахилу $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ головних осей $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ до горизонту): скидовий ($\alpha_1 \leq 30^\circ, \alpha_2 \leq 30^\circ$), зсувний ($\alpha_1 \leq 30^\circ, \alpha_2 \leq 30^\circ$), підкидовий ($\alpha_2 \leq 30^\circ, \alpha_3 \leq 30^\circ$); $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – орієнтування головних осей напружень (азимут і кут занурення); μ_σ – найбільш повторюване для виділеної стадії деформування значення коефіцієнта Лоде–Надаї (вид напруженого стану гірського масиву): -1 – однобічне розтягнення, +1 – однобічне стиснення; μ_ϵ – форма еліпсоїда сумарної розривної частини деформації (вид деформації гірського масиву): -1 – однобічне видовження, +1 – однобічне укорочення.

Розвиток найдавніших фаз деформаційного процесу F і E контролювався скидовим механізмом і відбувався за умов переважного видовження гірського масиву, що характеризуються величинами коефіцієнта Лоде–Надаї $\mu_\epsilon -0,44$ і $-0,43$ відповідно. Скидовий механізм, контрольований субвертикальною орієнтацією осі стиснення σ_3 , визначав умови для зменшення амплітуди вертикальних тектонічних рухів і, відповідно, виникнення

локальних зон зниженої проникності в гірському масиві. Особливістю процесу деформації стала переорієнтація осі розтягування σ_1 з південного заходу на фазі (F) на північний захід на фазі (E).

На фазі D деформування земної кори кінематичний тип механізму процесу стає зсувним і супроводжується посплабленням процесу видовження гірського масиву ($\mu_\epsilon = -0,11$).

Вид напруженого стану для фаз F–D є близьким до одновісного розтягнення.

Процес деформування на фазах C і B характеризується зміною (1) кінематичного типу механізму деформації із зсувного на підкидковий і (2) процесу видовження гірського масиву процесом його наростаючого укорочення ($\mu_\epsilon = 0,31$ і $0,58$ відповідно). Підкидковий механізм, контрольований субвертикальною орієнтацією осі розтягування σ_1 , визначав появу умов для збільшення амплітуди вертикальних тектонічних рухів і, відповідно, виникнення локальних зон підвищеної проникності в гірському масиві (розвиток процесів флюїдо-масопереносу). У процесі деформації відбулася переорієнтація осі стиснення σ_3 з північного сходу на фазі C на північний захід на фазі B. Зростання укорочення (ущільнення) гірського масиву і нова орієнтація осі σ_3 могли сприяти формуванню вторинної складчастості в досліджуваній структурі. Напрямок простягання осьової поверхні вторинної складки, орієнтованої близнормально до осі σ_3 , може підтверджувати достовірність висновків про кінематику умов деформації гірського масиву на фазі B.

На заключній фазі A деформування кінематичний тип механізму процесу стає знову зсувним, але вже з іншою, зворотною порівняно з фазою D, орієнтацією головних напружень, і супроводжується різким ослабленням процесу укорочення гірського масиву ($\mu_\epsilon = 0,06$). Подією заключного процесу деформації став прояв правозсувних тектонічних рухів уздовж осі Горлівської антикліналі. Вид напруженого стану для фаз C–A є близьким до одновісного стиснення (Никитенко, 2014; Volkova, Nikitenko, & Chernysh, 2016).

Таким чином, спрямований і успадкований характер змінення умов тектонічного навантаження структури західного периклінального замикання Горлівської антикліналі характеризується послідовним змінням деформаційних режимів від найдавнішого скидового до наймолодшого – зсувного (рис. 2). Абсолютні часові інтервали дії цих фаз визначити складно, проте остання фаза A за своїми параметрами синхронізується з наймолодшим, реконструйованим для Донбасу і Приазов'я альпійським полем тектонічних напружень (Корчемагин, & Емец, 1987; Корчемагин, & Рябоштан, 1987).

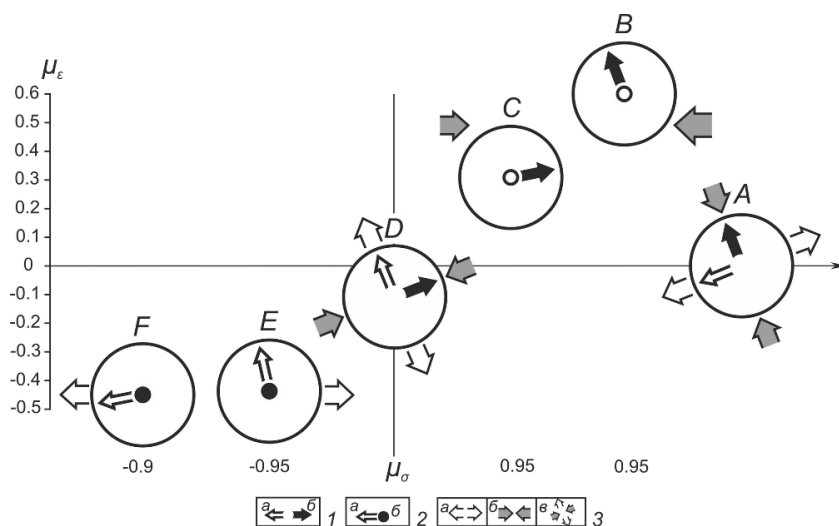


Рис. 2. Структура наймолодшого деформаційного циклу для західного периклінального замикання Горлівської антикліналі:

1 – проєкції осей головних напружень: а – σ_1 , б – σ_3 ; 2 – кут занурення осей напружень: а – похилі, б – круті; 3 – вид деформування гірського масиву: а – видовження, б – укорочення, в – зсув.

Поле деформацій. Поле сумарних крихких деформацій було реконструйовано за всією сукупністю замірних сколових зміщень з урахуванням знаку цих зміщень. Вид деформації (укорочення, видовження, зсув) гірського масиву визначався за величинами коефіцієнта Лодє–Надаї μ_ϵ , який описує характер деформування в рамках теорії пружності і виражається через головні значення тензора деформацій ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3 (аналогічно до коефіцієнту μ_σ).

Результати реконструкції показали, що згладжене поле сумарних крихких деформацій у зоні західного замикання Горлівської антикліналі є неоднорідним, орієнтування осей поля і вид деформацій змінюються як за площею досліджуваного району, так і у межах великих структурних форм.

Вісь максимального видовження ϵ_1 у межах північного крила орієнтована переважно у південно-західному (північна частина) і субширотному (приосьова частина) напрямках. На ділянці, обмеженій Північним і Осьовим насувами, орієнтування осі ϵ_1 менш витримане, вона варіює від південно-західного до

субширотного і субмеридіонального. Кут нахилу осі змінюється від відносно крутого ($30\text{--}45^\circ$) у північній частині до крутого (до 60°) поблизу Північного насуву і похилого ($10\text{--}20^\circ$) у приосьовій частині антикліналі (рис. 3а, в). Осьова частина характеризується субширотним, близпаралельним до орієнтування Осьового насуву, і майже горизонтальним положенням осі ϵ_1 . На ділянці південного крила, яка обмежена Осьовим і Торецьким насувами, вісь орієнтована у південно-західному напрямку, дещо розгортаючись до субмеридіонального в перехідній від Торецького до Головного насувів зоні і субширотного напрямків з наближенням до Головного насуву, поздовжньо до орієнтування останнього. У межах південного крила вісь ϵ_1 займає переважно похиле ($10\text{--}30^\circ$) положення (рис. 3а, г).

Вісь максимального укорочення ϵ_3 на північному крилі орієнтована у північно-західному – південно-східному напрямку, займаючи субширотне і субмеридіональне положення з наближенням до Північного і Осьового насувів відповідно (рис. 3б, е). Нахил осі варіює від переважно похилого ($10\text{--}35^\circ$) до крутого (до 50°) з наближенням до

осьової частини антикліналі (рис. 3б, е). У межах південного крила при наближенні до зони Торецького насуву вісь ε_3 розгортається до субширотного і далі – до субмеридіонального–північно-західного напрямку, займаючи переважно круте (50–60°) положення. У перехідній від Торецького до Головного насуву зони вона певною мірою зберігає напрямок свого орієнтування, проте стає більш похилою (рис. 3б, е) (Volkova, Nikitenko, & Chernysh, 2016).

Найбільш витриманим у просторі є орієнтування осі максимального видовження ε_1 , яка на переважній частині досліджуваної площі займає похиле положення і орієнтована у південно-західному напрямку (рис. 3а, д). Орієнтування осі максимального укорочення ε_3 є менш витриманим, особливо за кутом нахилу – від горизонтального до субвертикального (рис. 3б, ж). За величинами коефіцієнта Лоде–Надаї вид деформування гірського

масиву у межах західного замикання Горлівської антикліналі змінюється в діапазоні від майже одновісного видовження до одновісного укорочення ($\mu_\varepsilon = \pm 0,9$). Деформування гірського масиву у північному крилі контролювалося зсувним, скидо- і підкидо-зсувним механізмами за умов, близьких до зсувних з певним укороченням ($\mu_\varepsilon = 0,1$ при варіюванні від $-0,7$ до $0,9$); у південному крилі – переважно скидовим і скидо-зсувним механізмом за умов, близьких до зсувних з певним видовженням ($\mu_\varepsilon = -0,2$ при варіюванні від $-0,9$ до $0,5$) (рис. 3а, б). Загалом для досліджуваної площі осі головних деформацій характеризуються такими усередненими параметрами: вісь ε_1 – аз. пад. $210^\circ \angle 19^\circ$, вісь ε_3 – аз. пад. $330^\circ \angle 34^\circ$, $\mu_\varepsilon = -0,03$. За параметрами свого орієнтування еліпсоїд сумарних деформацій є близьким до еліпсоїду напружень.

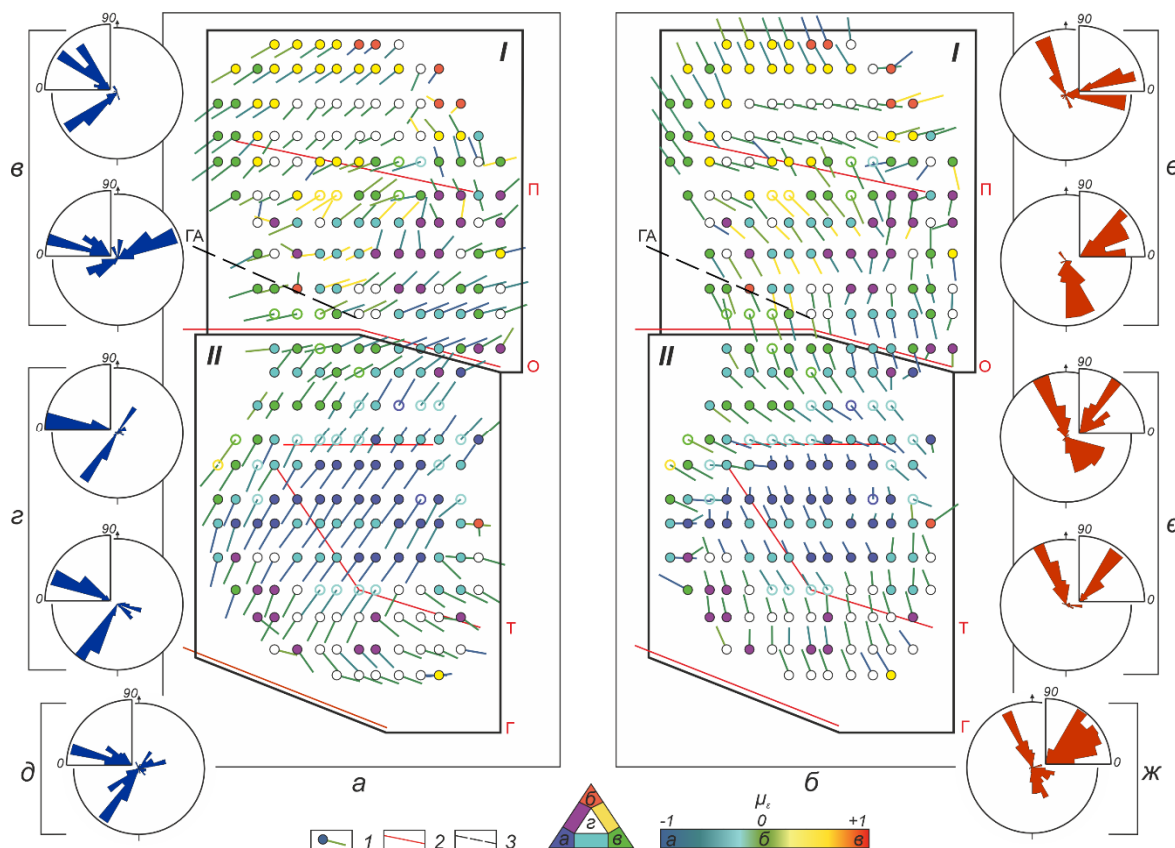


Рис. 3. Поле сумарних крихких деформацій для західного замикання Горлівської антикліналі:

Орієнтування головних осей еліпсоїду крихких деформацій: а – вісь максимального видовження ε_1 ;

б – вісь максимального укорочення ε_3 .

1 – пункти розрахунку параметрів поля деформацій з напрямком однієї з осей (довжина горизонтальної проекції відображає кут нахилу осі: коротша проекція – крутіший кут нахилу; занурення осі спрямовано від точки);

2 – лінії розривів (зображено схематично): П – Північний насув, О – Осьовий насув, Т – Торецький насув, Г – Головний насув;

3 – вісь Горлівської антикліналі (ГА).

Діаграми напрямку і кута занурення осей ε_1 (ліворуч) і ε_3 (праворуч) еліпсоїду крихких деформацій:

в, е – північне крило, г, з – південне крило, д, ж – зведена.

Геометричний тип поля деформацій (відповідно до величин кутів нахилу $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ головних осей $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ до горизонту):

а – скидовий ($\varepsilon_1 \leq 30^\circ, \varepsilon_2 \leq 30^\circ$), б – підкидовий ($\varepsilon_2 \leq 30^\circ, \varepsilon_3 \leq 30^\circ$), в – зсувний ($\varepsilon_1 \leq 30^\circ, \varepsilon_2 \leq 30^\circ$), г – "октаедричний" ($\varepsilon_1 > 30^\circ, \varepsilon_2 > 30^\circ, \varepsilon_3 > 30^\circ$).

Вид деформації гірського масиву (за даними визначення коефіцієнта Лоде–Надаї μ_ε):

а – одновісне видовження ($\mu_\varepsilon = -1$), б – зсув ($\mu_\varepsilon = 0$), в – одновісне укорочення ($\mu_\varepsilon = +1$).

З урахуванням реконструйованих полів напружень і деформацій можна припустити, що описана зсувна зона у східній частині першого блоку є безпосереднім продовженням регіонального правого зсуву приосьової частини Горлівської антикліналі, де реалізація правозсувних зміщень на завершальних фазах альпійського тектогенезу призвела до утворення спряженої пари зсувів, які були

закартовані в самій зсувній зоні. Горизонтальні зміщення мас у північно-західному – південно-східному напрямку у її південному крилі супроводжувалися стисненням у близгоризонтальній площині, що призводило до поздовжнього вигину шаруваті товщі з утворенням брахіантикліналі з поздовжніми субширотними насувками, що ускладнюють її крила. Горизонтальні зміщення в крилах насувів, що

формуються, за похилого залягання товщі призводили до утворення систем скидо-зсувів. Отже, весь набір зазначених деформаційних елементів західного замикавання Головної антикліналі можна розглядати як єдиний структурний парагенезис, утворення якого було спричинене правозсувними горизонтальними переміщеннями вздовж системи поздовжніх зсувів приосьової частини Головної антикліналі.

Дискусія і висновки

Встановлено, що реконструйоване для окремих ділянок району досліджень поле тектонічних напружень є зсувним з близгоризонтальним орієнтуванням осей головних нормальних напружень: вісь σ_1 – аз. прост. $50\text{--}60^\circ$ ($230\text{--}240^\circ$), вісь σ_3 – аз. прост. $320\text{--}330^\circ$ ($140\text{--}160^\circ$); для всього району досліджень воно характеризується такими параметрами: вісь σ_1 – аз. пад. $231^\circ \angle 20^\circ$, вісь σ_1 – аз. пад. $141^\circ \angle 5^\circ$. Це поле напружень за своїми параметрами є аналогічним до поля напружень, отриманого для Микитівського рудного поля, тобто є наймолодшим для Донецького басейну і датується ларамійською фазою альпійського тектогенезу. Спрямований і успадкований характер змінення умов тектонічного навантаження структури західного периклінального замикавання Горлівської антикліналі характеризується деформаційним рядом з шести напружених станів – від найдавнішого скидового (F) до наймолодшого зсувного (A), останній з яких за своїми параметрами синхронізується з наймолодшим, реконструйованим для Донбасу і Приазов'я альпійським полем напружень. Для поля сумарних крихких деформацій характерне таке просторове орієнтування головних осей: ε_1 – аз. пад. $210^\circ \angle 19^\circ$, вісь ε_3 – $330^\circ \angle 34^\circ$. Процес деформування гірського масиву контролювався переважно зсувним і перехідними скидо- і підкидо-зсувними механізмами. Деформації відбувалися за умов, близьких до зсувних з певним укороченням ($\mu_c = 0,1$) у північному і видовженням ($\mu_c = -0,2$) у південному крилах антикліналі.

Наведені вище приклади просторових взаємовідносин реконструйованого поля напружень з набором зазначених деформаційних елементів західного замикавання Горлівської антикліналі дають змогу розглядати останні як елементи структурного парагенезису, утворення якого було спричинене правозсувними горизонтальними переміщеннями вздовж системи поздовжніх зсувів приосьової частини Горлівської антикліналі, а фрагменти взаємної симетричності поля напружень і поля деформацій можуть розглядатися як доказ їх генетичного споріднення.

Список використаних джерел

- Гинтов, О. Б. (2005). *Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины*. Феникс.
- Гончар, В. В. (2019). Тектоническая инверсия Днепровско-Донецкой впадины и Донбасса (модели и реконструкции). *Геофизический журнал*, 41(5), 47–86.
- Гущенко, О. И., Гущенко, Н. Ю., Мострюков, А. О., Кузнецов, В. А., Сергеев, А. А., Петров, В. А., Ильин, А. В., Расцветаев, Л. М., Тверетина, Т. Ю., Сим, Л. А., Корчемагин, Д. В., Васильев, Н. Ю., Дудник, В. А., & Корчемагин, В. А. (2001). Тектонический стресс-мониторинг и поля напряжений Причерноморского региона. *Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия: Гірничо-геологічна*, 32, 104–117.
- Емец, В. С., Никольский, И. Л., Корчемагин, В. А., & Купенко В. И. (1986). Механизм образования структуры Никитовского рудного поля (Донбасс) по данным тектонофизических реконструкций и экспериментального моделирования. *Геологический журнал*, 46(1), 21–27.
- Корчемагин, В. А. (1970). *Трещинная тектоника и история развития структуры Никитовского рудного поля* [Дис. ... канд. геол.-минералог. наук, Донецк], ДПИ.
- Корчемагин, В. А. (1984). *Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса* [Дис. ... д-ра геол.-минералог. наук. Институт Физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР].
- Корчемагин, В. А., & Емец, В. С. (1987). Особенности развития тектонической структуры и поля напряжений Донбасса и Восточного Приазовья. *Геотектоника*, 3, 49–55.

Корчемагин, В. А., & Рябоштан, Ю. С. (1987). Тектоника и поля напряжений Донбасса. В В.Ю. Буланже (Ред.) *Поля напряжений и деформаций в земной коре* (с. 164–170). Наука.

Корчемагин, В. А., Дудник, В. А., Панов, Б. С., & Алехин, В. И. (2005). О связи тектонических деформаций и напряжений с рудоносностью в Донбассе. *Геофизический журнал*, 27(1), 97–109.

Никитенко, А.В. (2014). Поля напряжений западного замыкания Горловской антиклинали Донбасса и стадийность их развития. *Научные работы Донецкого Национального технического университета. Серия Гірничо-геологічна*, 1(20), 113–121.

Никольский, И. Л., Корчемагин, В. А., Емец, В. С., & Кледич, О. (1991). Тектоника Никитовского рудного поля. В А. Иванова и А. Оболенский (Ред.) *Условия локализации сурьмяно-ртутного и флюоритового оруденения в рудных полях* (с. 30–37). Наука, Сиб. отд.-ние.

Павлов, И. О., Никитенко, А. В., & Ткаченко, В. В. (2011). Кинематика разрывов и поля напряжений западного замыкания Главной антиклинали Донбасса. *Вугілля України*, 7, 43–45.

Nikitenko, O. V., & Chernysh, O. G. (2015). Use of the kinematic method for reconstruction of stress fields and mechanisms of the structure development in Donbas (on an example of the western closure of Horlivka anticline). *Геодинаміка*, 2(19), 47–54.

Saintot, A., Stephenson, R., Brem, A., Stovba, S., & Privalov, V. (2013). Paleostress field reconstruction and revised tectonic history of the Donbas fold and thrust belt (Ukraine and Russia). *Tectonics*, 22(5), 1059, <https://doi.org/10.1029/2002TC001366>

Sim, L., Korchemagin, V., Frischbutter, A., & Bankwitz, P. (1999). The neotectonic stress field pattern of the East European Platform. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 27(3–4), 161–181.

Volkova, T. P., Nikitenko, O. V. & Chernysh, O. G. (2016). Structural and tectonophysical aspects of the development of the western closure of the Horlivka anticline of the Donbas. *Научный вестник Национального гірничого університету*, 6, 5–13.

References

- Emets, V. S., Nikolskii, I. L., Korchemagin, V. A., & Kупенко, V. I. (1986). The mechanism of formation of the structure of the Nikitovka ore field (Donbas) according to tectonophysical reconstructions and experimental modeling. *Geological journal*, 46(1), 21–27 [in Russian].
- Gintov, O.B. (2005). *Field tectonophysics and its application to the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine*. Phoenix [in Russian].
- Gonchar, V. V. (2019). Tectonic inversion of the Dnieper-Donets Basin and Donbas (models and reconstructions). *Geophysical journal*, 41(5), 47–86 [in Russian].
- Gushchenko, O. I., Gushchenko, N. Yu., Mostriukov, A. O., Kuznetsov, V. A., Serheiev, A. A., Petrov, V. A., Ilin, A. V., Rastvetaiev, L. M., Tveretinova, T. Yu., Sim, L. A., Korchemagin, D. V., Vasyliov, N. Yu., Dudnik, V. A., & Korchemagin, V. A. (2001). Tectonic stress monitoring and stress fields in the Black Sea region. *Scientific Bulletin of Donetsk National Technical University. Mining and geological series*, 32, 104–117 [in Russian].
- Korchemagin, V. A. (1970). Joint tectonics, mechanism, and history of structure formation of the Nikitovka ore field. [Candidate dissertation (Geol.-Min. Sci), Donetsk], DPI [in Russian].
- Korchemagin, V. A. (1984). *Geological structure and stress fields in relation to evolution of endogenous regimes in the Donbas* [Doctoral dissertation (Geol.-Min. Sci), Schmidt Institute of Earth Physics of the Academy of Sciences of the USSR] [in Russian].
- Korchemagin, V. A., & Emets, V. S. (1987). Characteristics of development of tectonic structure and stress field of Donbas and Eastern Priazovye. *Geotectonics*, 3, 49–55 [in Russian].
- Korchemagin, V. O., & Riaboshan, Yu. S. (1987). Tectonics and stress fields of the Donbas. In Yu. Bulanzhe (Ed.), *Stress and strain fields in Earth's crust* (pp. 164–170). Nauka [in Russian].
- Korchemagin, V. A., Dudnik, V. A., Panov, B. S., & Alekhin, V. I. (2005). On the relationship between tectonic deformations and stresses and ore content in Donbas. *Geophysical Journal*, 27(1), 97–109.
- Nikitenko, O. V. (2014). Stress fields of western closure of Horlivka anticline of Donbas and staging of their development. *Scientific Bulletin of Donetsk National Technical University. Mining and geological series*, 1(20), 113–121 [in Russian].
- Nikitenko, O. V., & Chernysh, O. G. (2015). Use of the kinematic method for reconstruction of stress fields and mechanisms of the structure development in Donbas (on an example of the western closure of Horlivka anticline). *Geodynamics*, 2(19), 47–54.
- Nikolsky, I. L., Korchemagin, V. A., Emets, V. S., & Kledich, O. (1991). Tectonics of the Nikitovka ore field. In A. Ivanova and A. Obolensky (Eds.), *Conditions of localisation of antimony-mercury and fluorite mineralisation in ore fields* (pp. 30–37). Nauka, Siberian Branch [in Russian].
- Pavlov, I. O., Nikitenko, O. V. & Tkachenko, V. V. (2011). Kinematics of faults and stress fields of western closure of Main anticline of Donbas. *Coal of Ukraine*, 7, 43–45 [in Russian].
- Saintot, A., Stephenson, R., Brem, A., Stovba, S., & Privalov, V. (2013). Paleostress field reconstruction and revised tectonic history of the Donbas fold and thrust belt (Ukraine and Russia). *Tectonics*, 22(5), 1059, <https://doi.org/10.1029/2002TC001366>

Sim, L., Korchemagin, V., Frischbutter, A., & Bankwitz, P. (1999). The neotectonic stress field pattern of the East European Platform. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 27(3–4), 161–181.

Volkova, T. P., Nikitenko, O. V., & Chernysh, O. G. (2016). Structural and tectonophysical aspects of the development of the western closure of the

Horlivka anticline of the Donbas. *Scientific Bulletin of the National Mining University*, 6, 5–13.

Отримано редакцією журналу / Received: 12.08.23

Прорецензовано / Revised: 14.10.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Oleksandr NIKITENKO, PhD Student, Senior Geologist

ORCID ID: 0000-0001-7911-0760

e-mail: paleontologist78@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Brend-Vik LTD LLC, Kyiv, Ukraine

STRESS FIELDS AND GEOLOGICAL STRUCTURE OF WESTERN CLOSURE OF HORLIVKA ANTICLINE OF DONBAS PART 2. STRESS AND STRAIN FIELDS

Background. In tectonophysical studies, particular importance is placed on the mechanism of formation of large complex deformation structural elements, and the Horlivka anticline of the Donets Basin serves as such an example. Its importance lies not only in its complex structural composition and development mechanism but also in its potential impact on safe and efficient coal mining. This study aims to analyse the geological structure, stress and strain fields of the western closure of the Horlivka anticline that could be useful in forecasting geological factors for coal mining operations.

Methods. The paleostress analysis was performed on the collected fault orientation and kinematic data using Gushchenko's kinematic method based on the analysis of tectonic displacement vectors along slickensides. Mesoregional stress field characteristics were reconstructed by statistical processing of local stereographic solutions. The relative age chronology and staging of tectonic stresses were studied using the stress monitoring method. The characteristics of the principal axes of the total strain field were processed using the GEOS software.

Results. Mesoregional stress field is characterised by a subhorizontal NW–SE-oriented maximum principal stress axis and a subhorizontal NE–SW-oriented minimum principal stress axis. This stress regime is classified as a strike-slip regime and is the youngest one (Alpine orogeny) for the Donets Basin. The evolution of tectonic loading conditions of the studied structure is characterised by a deformation series of six stress regimes from the oldest (normal) to the youngest (strike-slip). Stretching axis of the strain ellipsoid is oriented NW and N–S, and shortening axis is oriented NE, nearly orthogonal to the anticline axis. Strike- and oblique-slip faulting regimes of the total strain field were determined for most of the study area, and the deformation has occurred under shear conditions, as indicated by the Lode–Nadai coefficient.

Conclusions. A structural pattern of deformation elements, including a conjugate strike-slip fault system of the shear zone, a dome-shaped fold, and longitudinal thrusts in its limbs, may be interpreted as a single pattern of structural paragenesis developed by right-lateral displacements along the longitudinal strike-slip fault system within the Horlivka anticline paraxial part. Fragments of mutual symmetry between the stress and strain fields can be taken as evidence of their genetic relationship.

Keywords: geological structure, shear deformation, kinematic indicator, stress field, brittle deformation field, kinematic method, Lode–Nadai.

Автор заявляє про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The author declares no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.10>

Станіслав ЛИТВИНЮК, канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0003-3763-2100
e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна

Наталія БАРЯЦЬКА, д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-8068-2464
e-mail: bariatskaN@gmail.com
ТОВ "Софтмайн", Київ, Україна

МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ОЦІНКИ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ КРИТИЧНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ СИРОВИНИ УКРАЇНИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. М.М. Курило)

Промислова та технологічна увага до критичної (стратегічної) мінеральної сировини у глобальній економіці з огляду на її природну обмеженість набуває ключового значення. Забезпеченість країни (або регіону) сировиною є чинником економічної безпеки, автономності та засобом страхування від глобальних криз. Світові та регіональні аналітичні дослідження щодо оцінки ресурсів мінеральної сировини, в контексті розвитку циркулярної та ресурсоефективної (низьковуглецевої) економіки, виявили ряд проблемних питань, пов'язаних з різними методичними підходами до оцінки, класифікації, обліку та управління критичної мінеральної сировини (КМС). Уніфікація таких підходів для економічно пов'язаних регіонів є шляхом до створення надійних ланцюгів постачання КМС та сталого економічного розвитку.

З метою виконання окреслених завдань було використано широкий комплекс досліджень, який включав загальнонаукові та спеціальні методи наукових і прикладних досліджень. Окрім загальнотеоретичних методів аналізу, статистики та систематизації використано комплекс методів геологічного та техніко-економічного вивчення мінеральної сировини.

Розглянуто різні класифікаційні системи, що використовуються для оцінки та управління КМС. Наведено практичний досвід застосування рамкової класифікації Організації Об'єднаних Націй (РКООН) під час оцінки ресурсного потенціалу видів критичної мінеральної сировини в Україні (без вуглеводнів та підземних вод) в переліку Європейського Союзу. Враховуючи поточний стан мінерально-сировинної бази України, авторами запропоновано методичні інструменти приведення Державного балансу до інтегрованого системного обліку згідно з РКООН.

Аналіз Державного балансу України з використанням підходів РКООН виявив головні перспективи розвитку мінерально-сировинної бази, що пов'язані з потенційними та перспективними проєктами по 22 елементах зі списку критичної мінеральної сировини ЄС. Україна має всі передумови стати учасником програм Європейського Союзу, що покликані створити стійкі моделі ланцюгів постачання різноманітних ресурсів для переходу на споживання замкнутого циклу з нульовими відходами.

Ключові слова: критична мінеральна сировина, управління мінеральними ресурсами, категорії, ознаки класифікацій, рамкова класифікація Організації Об'єднаних Націй (РКООН), система управління ресурсами Організації Об'єднаних Націй (СУРООН).

Вступ

У більшості розвинених країн світу застосовуються принципи сталого економічного розвитку. Доступ до мінеральної сировини має вирішальне значення для надійного функціонування економіки. Упродовж останніх років з'являється все більше аналітичної інформації щодо "найбільш важливої" мінеральної сировини, якій надають різні "об'єднувальні" назви (критична сировина, мінерали майбутнього, мінерали зелених технологій, стратегічна корисна копалина і т. ін.). Країни з розвинутими економіками дещо по-різному формують перелік критичної мінеральної сировини, але по всьому світу головним її "споживачем" є екологічно чисті енергетичні технології (атомна, сонячна, вітрова та водна енергетика) та зростання виробництва електричних транспортних засобів.

Згідно з даними американського Інституту геологічних наук (The American Geosciences Institute), "критичні корисні копалини" (critical minerals) – це важливі для економіки корисні копалини, постачання яких може бути порушено (Critical Materials..., 2023). Спеціалісти Європейського Союзу критичної сировини (Critical Raw Materials Alliance) визначають "критичну сировину" (critical raw materials) як економічно й стратегічно важливу для європейської економіки сировину з високими постачальними ризиками. Відповідно до визначення провідної наукової геологічної організації при уряді Австралії (Geoscience Australia) критично важливими корисними копалинами є метали і неметали, які вважають життєво важливими для економічного добробуту великих і розвинутих економік світу, але з постачанням яких можуть виникати проблеми через геологічний дефіцит, геополітичні проблеми, торгівлю політикою або

інші чинники (Critical Minerals..., 2023). Головними характерними ознаками критичної мінеральної сировини (корисної копалини) є її важливість для економіки й ризики дефіциту. Різновиди мінеральної сировини, які мають важливі напруження використання й стикаються з потенційними перебоями в постачанні, мають вирішальне значення для економічної й національної безпеки країни або регіону (Schulz et al., 2017).

Враховуючи динаміку використання КМС, а також постійного розширення її переліку, актуальним є розробка єдиних (універсальних) методичних підходів визначення параметрів "критичності" і оцінки ресурсного потенціалу країни або регіону.

Україна є державою з потужною мінерально-сировинною базою (Мінеральні ресурси..., 2021), багатства надр якої зумовлені особливостями геологічної будови її території. Україна є одним із провідних світових виробників деяких видів корисних копалин, у тому числі такої важливої сировини, як марганець, титан і графіт. Застосування в Україні РКООН та СУРООН у сталому управлінні ресурсами (оцінка, облік, використання), включаючи критичну сировину, відіграє важливу соціальну та екологічну роль у покращенні розвитку циркулярної та ресурсоефективної економіки.

За прогнозами Всесвітнього банку (Grohol, & Veeh, 2023), для задоволення дедалі більшого попиту на чисті енергетичні технології, потреба у таких елементах, як графіт, літій і кобальт, зростає у кілька разів. Перелік критичних корисних копалин, потрібних для переходу на "зелену" енергетику, охоплює алюміній, хром, кобальт, мідь, графіт, індій, залізо, свинець, літій, манган,

© Станіслав Литвинюк, Наталія Баряцька, 2024

молібден, неодим, нікель, срібло, титан, ванадій і цинк. Більшість із них належить до критичної мінеральної сировини в розвинених країнах. Ці метали вважаються життєво важливими для найбільших економік світу, але водночас їхня пропозиція на ринку – це постійний об'єкт для низки ризиків, пов'язаних, наприклад, з дефіцитом геологічних ресурсів, геополітичними проблемами, торговою політикою чи іншими зовнішніми чинниками.

Україна була й залишається видобувною державою і потенційно може стати серйозним гравцем на ринку сировинних ресурсів. Мінерально-сировинний комплекс України є міцним фундаментом економіки держави і важливим потенціалом для її процвітання, що забезпечує вагомий частку валового національного продукту.

У нормативному полі України, що регулює сферу вивчення та управління мінерально-сировинним комплексом, поняття або термін "критична мінеральна сировина" відсутній. Нормативно-методичні документи регулюють визначення таких понять, як корисні копалини місцевого та загальнодержавного значення, іншими документами зазначено поняття корисних копалин стратегічного значення. Враховуючи інтеграційні процеси в європейську модель розвитку, актуальним для України є формування методики визначення поняття та оцінки КМС, що має важливе стратегічне значення для економіки країни та її сталого розвитку.

Огляд останніх досліджень і публікацій та формулювання цілей статті. Поняття КМС, методики визначення критичності, актуальні переліки та стратегії щодо КМС різних країн та регіонів обговорюються у роботах (Australia's..., 2023; Canada and U.S..., 2020; Carrara et al., 2023; Hund et al., 2020; Isetani et al., 2022; Nakano, 2021; Report..., 2014).

Характеристики різних класифікаційних систем та їхні підходи до геологічного вивчення та оцінки родовищ корисних копалин відображені в монографіях і роботах (Балега, Вижва, & Курило, 2018; Рудько та ін., 2012; UNFC..., 2019; International Reporting..., 2019; Класифікація..., 1997).

Питання гармонізації основних класифікаційних систем світу відображені в так званих мостових документах Європейської економічної комісії (ЄЕК) ООН (Bridging..., 2015; ECE/ENERGY/GE.3/2021/10; ECE/ENERGY/GE.3/2022/6).

Стратегічна та критична мінеральна сировина України та її загальне значення для економічної безпеки та сталого розвитку обговорюються у наукових публікаціях (Баряцька, 2020; Рудько, & Бала, 2021; Рудько та ін., 2021; Вижва, Курило, & Балега, 2018).

Законодавчі особливості у сфері надрокористування відображені у чинних нормативно-правових актах (Положення..., 1994; Кодекс..., 1994).

Незважаючи на досить широке висвітлення стану мінерально-сировинної бази України, а також деякі аспекти застосування міжнародних класифікацій оцінки корисних копалин, практично не висвітленим залишається стан та кількість КМС в Україні, а також шляхи впровадження передових світових практик оцінки та управління КМС.

Виходячи з передумов, необхідних для сталого розвитку та створення ефективної системи управління ресурсами (первинними та вторинними), у роботі викладено методичні підходи до визначення та оцінки КМС, а також міжнародні класифікаційні системи для оцінки ресурсного потенціалу та управління КМС.

Результати

Поняття та методики визначення КМС. Стратегія сталого розвитку суспільства передбачає належне забезпечення суспільства мінеральною сировиною, тому уніфікована оцінка та системний облік має важливе значення. Базові поняття та переліки КМС змінювалися у часі та були пов'язані з істотними змінами геополітичних та технологічних обставин (світові війни, індустріалізація, технологічні "революції" тощо).

Країни "Групи семи" та Європейський Союз в останні роки розгорнули широкі програми щодо стратегій визначення, формування переліку та управління КМС (Methodology..., 2017).

Серед підходів визначення поняття КМС слід виділити роботи, виконані в рамках проєктів ЄС (Генеральний директорат з питань внутрішнього ринку, промисловості, підприємництва та малого та середнього бізнесу).

У 2017 р. було розроблено директивний документ, який містить керівні принципи визначення та методики оцінки КМС для ЄС (Methodology..., 2017). Відповідно до цього методичного документу у 2023 р. розроблено та опубліковано фінальний звіт з дослідження КМС для ЄС (Grohol, & Veeh, 2023). Згідно з цими дослідженнями, методика визначення та оцінки КМС (рис. 1) базується на двох загальних групах параметрів: економічне значення (economic importance – EI) та ризик постачання (supply risk – SR).

Для розрахунків економічного значення у формулі враховується:

- частка кінцевого використання сировини в секторі економіки (**As**);
- додана вартість зазначеного сектору економіки (**Qs**);
- індекс заміщення сировини (**SI_{EI}**).

Параметри ризиків постачання базуються на концентрації первинних поставок із країн-виробників КМС, враховуючи ефективність їх управління та торговельні аспекти, та включають:

- глобальне постачання, група країн світових постачальників (**GS**);
- фактичне джерело поставок до ЄС, тобто внутрішнє виробництво ЄС плюс інші країни-імпортери до ЄС (EU sourcing);
- індекси **HHI** та **WGI**, що визначають параметри концентрації КМС та їх систему управління;
- імпортна залежність (**IR**);
- здатність до переробки наприкінці життєвого циклу (**EOL_{IR}**);
- індекс заміщення, пов'язаний з ризиком пропозиції (**SI_{SR}**).

Перелік КМС встановлюється на основі оціненої сировини, яка досягає або перевищує порогові значення для обох параметрів, визначених Європейською Комісією. Розрахунки базуються на середніх даних за останні п'ять років. Для різних параметрів враховується пріоритет, якість і доступність даних.

Отже, параметри (індикатори) критичності можуть бути різними: ризик дефіциту (supply risk) та економічне значення (economic importance), або ризик пропозиції (концентрація виробництва), зростання виробництва (зміна розмірів ринку й геологічних ресурсів) і динаміка ринку (зміна ціни). Іноді додатково застосовують різні підходи для об'єктивнішого порівняння мінеральної сировини з різними за обсягами ринками. У такому разі загальну економічну значущість обчислюють за відношенням валової доданої вартості до ВВП країни або регіону.

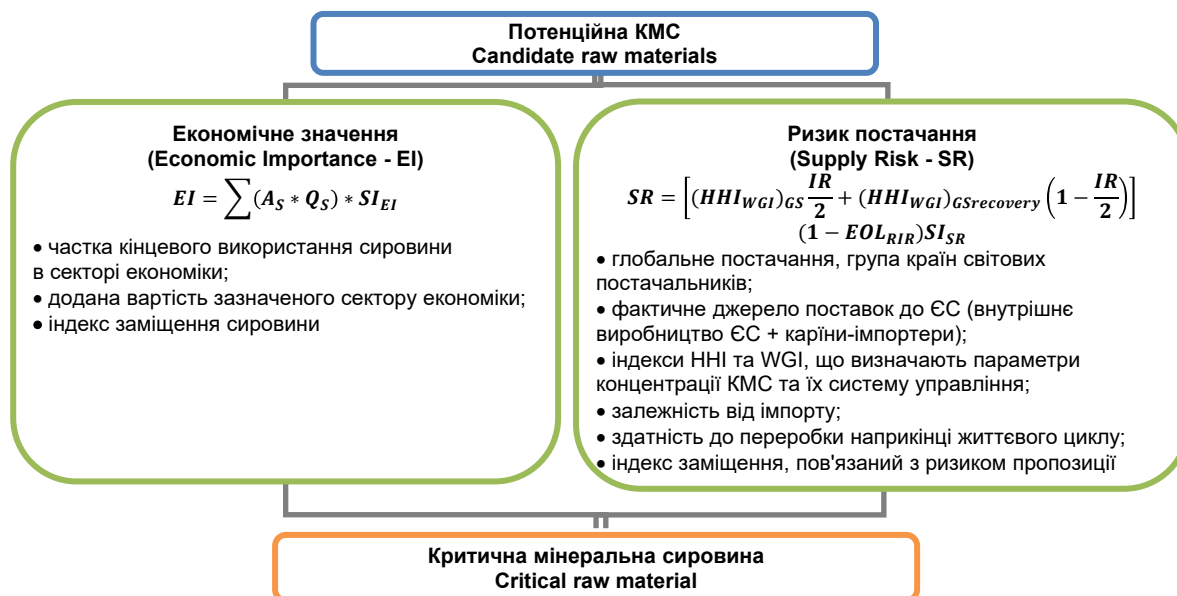


Рис. 1. Методологічна схема визначення КМС за даними (Methodology..., 2017)

Автори проаналізували значну кількість параметрів "критичності" мінеральної сировини, використовуючи різні праці європейських та українських фахівців. За результатами досліджень встановлено, що більшість параметрів, які визначають перелік критичної сировини, є двохкоординатна система понять: економічна важливість та логістичні параметри постачання.

На думку авторів, такий підхід не відображає комплексності цього питання і не може повною мірою бути застосований під час визначення переліку критичної мінеральної сировини на різних рівнях державних і фінансових інститутів.

Параметри визначення та система управління критичною мінеральною сировиною – це реалізація складного комплексу юридично-правових, геолого-економічних і соціально-політичних чинників, що врегульовують геологічне вивчення та використання мінеральної бази країни, регіону та світу. Враховуючи методичні засади РКООН та СУРООН, перелік критичної мінеральної сировини слід визначати за такими параметрами:

соціально-економічні чинники (вісь E):

- зростання об'єму виробництва;
- розширення спектра видів виробництва;
- об'єми постачання;
- концентрація виробництва;
- вплив військово-політичних конфліктів;
- інші чинники (динаміка ринку, економічне значення, екологія тощо).

технологічні чинники (вісь F):

- розвиток технологій видобутку, збагачення та виробництва;

- зміна матеріальної складової технологічного процесу;
- "екологічність" технологій.

геолого-промислові чинники (вісь G):

- наявність ресурсної бази;
- ступінь вивченості та промислового освоєння;
- наявність гірничодобувної інфраструктури та логістики.

Критична мінеральна сировина. Переліки критичних корисних копалин (різновидів мінеральної сировини) є частиною політики щодо розвитку мінерально-сировинної бази країн і регіонів. Як можна бачити з табл. 1, складеної на основі даних ЄС про переліки КМС, понад

10 років зберігається стійка тенденція до розширення переліку КМС Європейського Союзу, який за цей час збільшився з 16 до 34. Ряд корисних копалин, таких як берилій, вольфрам, графіт, германій, РЗЕ та ін., усі ці роки зберігають своє критичне значення для економіки ЄС. Інші, наприклад, літій, марганець, алюміній, титан, додавалися поступово. Деякі, такі як хром, каучук, індій, лише на деякий період набували критичного значення. Загалом переліки КМС є досить показовими з погляду розвитку (або стимулювання) певних напрямків економіки та промисловості для даного регіону.

Як можна бачити з діаграми (рис. 2), переліки КМС США, ЄС і України мають досить багато спільних видів сировини. У той же час український перелік досить суттєво відрізняється і має 8 власних. Нині наші стратегічні корисні копалини більш подібні до переліку КМС США, ніж ЄС, що є досить нелогічним. Це може бути пов'язано не лише з різним розвитком економіки та промисловості, але й з методиками визначення критичності (стратегічності).

Методичні підходи оцінки ресурсного потенціалу та управління КМС. У регіоні ЄЕК ООН і України, в різних юрисдикціях державного та "корпоративного" рівня діє кілька класифікаційних систем оцінки запасів і ресурсів мінеральної сировини та інших ресурсів (антропогенні, відновлювальні енергетичні та ін.). Серед класифікаційних систем мінеральної сировини, що застосовуються, слід виділити:

1. Рамкова класифікація ресурсів Організації Об'єднаних Націй (РКООН) – універсальна система глобального рівня, в якій запаси класифікують на основі трьох фундаментальних критеріїв: (1) економічної і соціальної життєздатності проєкту; (2) статусу й обґрунтованості проєкту освоєння родовища; (3) геологічної вивченості з використанням цифрової системи кодів.

2. Шаблон міжнародної звітності Комітету з міжнародних стандартів звітності по запасах (CRIRSCO). Шаблон подання звітності про результати геологорозвідувальних робіт, мінеральні ресурси і запаси твердих корисних копалин інтегрує мінімально необхідні стандарти вимоги, прийняті в національних стандартах звітності окремих країн світу, з рекомендаціями і вказівками. Ресурси і запаси класифікуються на достовірності оцінки кількості, вмісту (якості), форми, щільності та інших фізичних

характеристиках. Головними принципами дії і застосування Шаблону є прозорість, матеріальність (істотність) і компетентність (transparency, materiality and competence).

3. Система класифікації запасів і ресурсів корисних копалин СРСР (на основі Класифікації СРСР 1981 р.) – використовується багатьма країнами пострадянського простору та Східної Європи. Основою класифікації запасів і ресурсів є здебільшого ступінь геологічної розвіданості.

4. З прийняттям у 1997 р. нової Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр, що розроблена відповідно до РКООН, в Україні впроваджені єдині для державного фонду надр України принципи підрахунку, геолого-економічної оцінки, державного обліку та звітності про використання запасів і ресурсів корисних копалин згідно з рівнем їх соціально-економічного значення (вісь Е), ступенем техніко-економічної вивченості і підготовленості покладів корисних копалин до подальшого використання (вісь F), а також ступенем геологічної

вивченості і достовірності (вісь G), відповідно до категорій РКООН запасів і ресурсів викопних енергетичних і мінеральних корисних копалин (рис. 3).

В Україні ведеться системний облік запасів та ресурсів усіх видів корисних копалин, який являє собою систему збору, обробки та зберігання даних про результати геологорозвідувальних та гірничодобувних робіт (Державний баланс..., 2021). Система обліку об'єктів державного фонду надр включає інформацію Державного кадастру родовищ і проявів корисних копалин та Державного балансу запасів корисних копалин (табл. 2), а також державну звітність та звітність підприємств, установ, організацій та громадян, які використовують надра або здійснюють проектування, будівництво, реконструкцію, експлуатацію, ліквідацію чи консервацію гірничодобувних об'єктів, у т. ч. у межах континентального шельфу і виключної (морської) економічної зони.

Таблиця 1

Тенденції з переліків критичних корисних копалин ЄС з 2011 до 2023 року

№	Критична мінеральна сировина	2011	2014	2017	2020	2023
1	Алюміній (бокситові руди)					
2	Барит					
3	Берилій					
4	Борати					
5	Ванадій					
6	Вісмут					
7	Вольфрам					
8	Гафній					
9	Галій					
10	Гелій					
11	Германій					
12	Графіт					
13	Індій					
14	Кобальт					
15	Коксівне вугілля					
16	Кремній металевий					
17	Літій					
18	Магній					
19	Магнетит					
20	Марганець					
21	Метали платинової групи					
22	Миш'як					
23	Мідь					
24	Натуральний каучук					
25	Нікель					
26	Ніобій					
27	Плавиковий шпат (флюорит)					
28	Польовий шпат					
29	РЗЕ (важкі)					
30	РЗЕ (легкі)					
31	Скандій					
32	Стибій (Сурма)					
33	Стронцій					
34	Тантал					
35	Титан					
36	Фосфор					
37	Фосфоритові руди					
38	Хром					

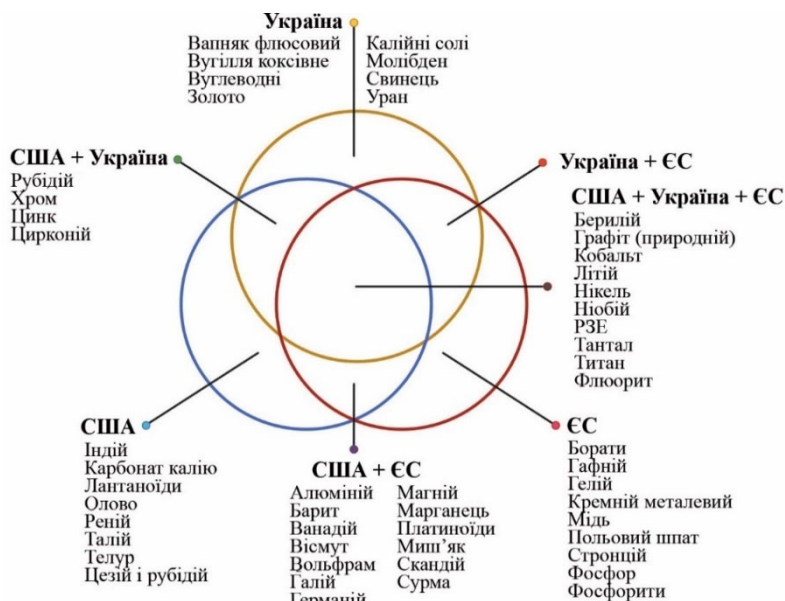


Рис. 2. Порівняльна діаграма переліків критичних корисних копалин США, ЄС та стратегічних корисних копалин України



Рис. 3. Застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр

Таблиця 2

Аналіз облікованих об'єктів державного фонду надр (станом на 01.01.2022)

Корисна копалина	У промисловій розробці	Кількість родовищ всього (ділянок надр)	Кількість ділянок родовищ, оцінених відповідно до Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр (РКООН)	Кількість ділянок родовищ, оцінених відповідно до Класифікації СРСР 1960, 1981 рр.
Газ природний	285	467	467	—
Нафта	145	216	216	—
Металічні (рудні)	60	157	64	93
Води (мінеральні, питні, технічні)	913	1873	717	1156
Вугілля	337	1039	512	527
Торф	40	682	55	627
Неметалічні (будівельні, гірничохімічні, гірничотехнічні)	1149	4738	1940	2798
Каміння коштовне та колекційне	9	19	19	—
Разом	2929	9191	3971	5201

Основним завданням обліку запасів корисних копалин є отримання повних і достовірних даних про поточний стан мінерально-сировинної бази підприємства, галузі і країни в цілому, ступеня розвіданості і підготовленості родовища для промислової розробки, забезпеченості гірничодобувних підприємств розвіданими запасами.

Поточний аналіз облікованих об'єктів державного фонду надр проведений відповідно до чинної нормативно-правової бази у сфері надрокористування та методики оцінки РКООН.

Головними критеріями характеристики облікованих ділянок надр є рівень достовірності геологічного вивчення, рівень технологічного та техніко-економічного вивчення, соціального та промислового значення (рис. 3).

Геологічне вивчення (Вісь G) корисних копалин, відповідно до Класифікації, має за мету визначення з висхідною детальністю речовинного складу, кількісних і якісних характеристик, технологічних властивостей корисних копалин, геологічної будови, гідрогеологічних, гірничо-геологічних та інших умов залягання їх покладів для обґрунтування проектних рішень щодо способу і системи видобутку та схеми комплексної переробки мінеральної сировини.

За ступенем геологічного вивчення і достовірності нагромадження виділяють – розвідані (доведені) і попередньо розвідані (ймовірні) запаси, перспективні і прогнозні ресурси.

Техніко-економічне вивчення (Вісь F) корисних копалин передбачає визначення гірничотехнічних, географо-економічних, технологічних та інших умов розробки родовищ корисних копалин і переробки мінеральної сировини, а також умов реалізації товарної продукції гірничого виробництва з метою геолого-економічної

оцінки промислового значення виявленого накопичення корисних копалин.

Соціальне, економічне та промислове значення (Вісь E) запасів та ресурсів корисних копалин визначається на підставі комплексних даних (економічних, соціально-екологічних та ін.) і поділяється на групи: балансові, умовно балансові та позабалансові, з невизначеним промисловим значенням.

Так, за ступенем вивченості балансові запаси можуть належати до класів під кодами 111, 121 і 122 (підтверджена екологічна та соціально-економічна здатність проекту). Умовно балансові запаси входять до класу під кодом 211 (за реалістичними прогнозами або у разі змін природоохоронного законодавства проект може бути життєздатним). Позабалансові запаси належать до класів 221 та 222 (у разі змін ціни та попиту проект може бути життєздатним). Детально та попередньо розвідані запаси корисних копалин, балансова належність яких не визначена, об'єднані класами 331 та 332 (проект перебуває на ранніх стадіях дослідження). Перспективні та прогнозні ресурси становлять класи 333 та 334 відповідно. Крім того, серед запасів з невизначеним промисловим значенням виділяються залишкові (додаткові) у надрах запаси, що не видобуваються, об'єднані класами 341, 342, 343 та 344.

Проаналізувавши дані Державного балансу запасів корисних копалин і наявних проявів в Україні (рис. 4) із застосуванням вищевикладеної методики та порівнявши їх із наведеними в таблиці критичними для ЄС позиціями, встановлюється певний ресурсний потенціал України, що дає змогу налагодити видобуток і стати важливим постачальником переважної більшості зазначених елементів.

	Ресурсний потенціал України в постачанні критичної мінеральної сировини для ЄС		
	Мінерал / Метал	Родовища (обліковані / ліцензовані об'єкти)	Код РКООН
Життєздатні проекти Коксівне вугілля, графіт, марганець, кремній металевий, титан, ванадій, циркон	Алюміній	3 / 0	331, 332
	Барит	1 / 0	331, 332
	Берилій	3 / 1	111, 122, 211, 222, 333, 334
	Ванадій	8 / 7 (комплексні)	111, 122, 221, 331, 332
	Гафній	2 / 2 (комплексні)	111, 221, 331
Потенційно життєздатні проекти Берилій, кобальт та нікель, мідь, гафній, літій, РЗЕ, скандій, тантал та ніобій	Германій	220 / 74 (без видобування)	331, 332
	Графіт	6 / 2	111, 121, 222, 331, 332
	Кобальт та нікель	12 / 3	122, 331, 332, 333
	Коксівне вугілля	28 / 26	111, 122
	Кремній металічний	6 / 6	111, 222, 332
	Літій	4 / 1	122, 222, 332
	Магній	2 / 0	331, 332
	Марганець	5 / 3	111, 121, 122, 221, 331, 332
	Мідь	5 / 3	122, 332, 333
	РЗЕ	3 / 2 (комплексні)	122, 331, 332
	Скандій	12 / 3 (комплексні)	222, 332, 333
	Стронцій	1 / 0 (комплексні)	331, 332
Перспективні проекти Алюміній, барит, флюорит, германій, магній, стронцій	Тантал та ніобій	4 / 3 (комплексні)	111, 122, 331, 332
	Титан	20 / 10	111, 121, 122, 221, 331, 332
	Флюорит	3 / 0	121, 331, 332, 333
	Фосфоритові руди	3 / 1	111, 122, 331, 332
	Циркон	8 / 7 (комплексні)	111, 122, 221, 222, 331, 332

Рис. 4. Ресурсний потенціал України в постачанні критичної мінеральної сировини для ЄС

З метою об'єктивної оцінки ресурсного потенціалу КМС слід додати деякі роз'яснення щодо підходів формування викладеного переліку.

1. До переліку увійшли ділянки надр, що обліковані у встановленому порядку законодавством України у Державному балансі запасів корисних копалин України.

2. Значна кількість корисних елементів зосереджена у комплексних родовищах (тантал і ніобій, нікель і кобальт, титан, ванадій і т. ін.). У такому разі об'єкти повторювались, а кількість ресурсів зазначалась окремо за елементами.

3. Ресурсний потенціал кваліфікований відповідно до Національної класифікації запасів та ресурсів корисних копалин України (фактичний облік).

4. Відповідно до національного законодавства та у зв'язку з військовою агресією Росії проти України, частина даних та інформації закриті й мають обмежений доступ (берилій, літій, циркон, скандій, титан, тантал та ніобій).

5. Крім того, слід зазначити, що близько 5200 ділянок надр потребують переоцінки в поточних умовах згідно з принципами сучасних та чинних класифікаційних систем.

Детальний аналіз понад 140 об'єктів (ділянок надр, родовищ) дав змогу надати інформацію щодо 22 корисних елементів. Із врахуванням методичних підходів РКООН перелік КМС класифікований відповідно до класів, що відображають стадію геологічного вивчення та промислового освоєння.

Дискусія і висновки

Нормативно-правова політика України передбачає досягнення цілей сталого розвитку, забезпечення раціонального, комплексного використання ресурсних потреб суспільного виробництва, охорони надр, гарантування при користуванні надрами безпеки людей, майна та навколишнього природного середовища, а також охорони прав і законних інтересів підприємств, установ, організацій та громадян.

Базові принципи формування та управління ресурсами України відповідають РКООН та реалізуються з 1997 р. РКООН – універсальна класифікаційна система, в якій ресурси класифікують на основі трьох фундаментальних критеріїв: (1) екологічної і соціально-економічної життєздатності проекту (Е); (2) статусу й обґрунтованості проекту освоєння родовища (F); (3) геологічної вивченості або рівня достовірності знань (G) з використанням цифрової системи кодів.

ЄЕК ООН, спираючись на РКООН, продовжує розвивати СУРООН, яка стане добровільно прийнятим глобальним стандартом фундаментальних принципів інтегрованого управління ресурсами, у тому числі КМС.

Фундаментальні принципи РКООН та СУРООН вже функціонують на національних і глобальних рівнях (міжнародні центри передового досвіду – "ICE"). Активно продовжуються програми Європейського Союзу покликані створити стійкі моделі ланцюгів постачання різноманітних ресурсів для переходу на споживання замкнутого циклу з нульовими відходами.

Методика визначення КМС, що застосовується на двох базових параметрах економічної важливості та ризику постачання, дозволяє для розвинутих економік будувати середньо та довгострокові стратегії управління ресурсами. В Україні під час визначення та оцінки КМС працює група параметрів економічної важливості. Перелік КМС поглинається поняттями стратегічної корисної копалини.

Необхідною умовою для забезпечення надійних міжрегіональних ланцюгів постачання КМС та залучення інвестицій у їх геологічну розвідку та видобування є інтегрування України до міжнародної системи управління ресурсами КМС. Для цього необхідно затвердити методичні підходи до визначення, оцінки ресурсів та управління КМС з урахуванням передових світових практик. Доцільно також проводити дослідження критичності мінеральної сировини на державному рівні та затверджувати відповідні переліки. Це може бути також механізмом стимулювання розвитку певних напрямів геологічного вивчення й видобування корисних копалин.

Аналіз Державного балансу України з використанням підходів РКООН виявив головні перспективи розвитку

мінерально-сировинної бази, що пов'язані з потенційними та перспективними проектами по 22 елементах зі списку критичної мінеральної сировини ЄС. Україна має всі передумови стати учасником програм Європейського Союзу, що покликані створити стійкі моделі ланцюгів постачання різноманітних ресурсів для переходу на споживання замкнутого циклу з нульовими відходами. Попри значний ресурсний потенціал України наша промисловість характеризується технологічною відсталістю і низькою інноваційною активністю суб'єктів господарювання, застарілою структурою обробної промисловості, посиленням технологічної залежності від інших країн. У таких умовах мінерально-сировинна база розглядається як джерело постачання КМС з низькою доданою вартістю.

Внесок авторів: Станіслав Литвинюк – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування); Наталія Баряцька – формальний аналіз, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

- Балега, А., Вижва, С., & Курило, М. (2018). Інституційне забезпечення геологічного вивчення та використання надр: національний вимір і міжнародний досвід. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(83), 63–72.
- Баряцька, Н. В. (2020). Поняття критичної мінеральної сировини – інструмент стимулювання розвитку надрокористування в Україні. *Мінеральні ресурси України*, 2, 13–18. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.2.13-18>
- Вижва, С., Курило, М., & Балега, А. (2018). Основні інструменти державного планування і фінансового забезпечення геологічного вивчення надр в Україні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(81), 56–62.
- Державний баланс запасів корисних копалин України на 01.01.2021. (2021). Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України".
- Класифікація запасів і ресурсів корисних копалин Державного фонду надр. (1997). Постанова Кабінету Міністрів України № 432 від 05.05.97. *Офіційний вісник України*, 19, 104.
- Кодекс України "Про надра" від 27.07.1994 р. № 132/94. (1994). *Відомості Верховної Ради України*, 36, 340.
- Мінеральні ресурси України. (2021). Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України".
- Положення про порядок проведення державної експертизи та оцінки запасів корисних копалин. (1994). Постанова Кабінету Міністрів України від 22.12.1994 р. № 865. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/865-94-%D0%BF#Text>.
- Портфоліо критичної сировини України. (2023). Державна служба геології та надр України. <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/critical-minerals-portfolio-ua.pdf>.
- Рудько, Г. І., & Бала, Г. Р. (2021). Критична мінеральна сировина та її перспективи в Україні. *Мінеральні ресурси України*, 2, 3–14. <https://doi.org/10.31996/mru.2021.2.3-14>
- Рудько, Г. І., Нецький, О. В., Назаренко, М. В., & Хоменко, С. А. (2012). Національні та міжнародні системи класифікації запасів і ресурсів корисних копалин: стан та перспективи гармонізації. Букрек.
- Рудько, Г. І., Литвинюк, С. Ф., Карли, В. Е., & Бала, Г. Р. (2021). Родовища критичної мінеральної сировини України. Стан і перспективи. Букрек.
- Australia's Critical Minerals List. (2023). Department of industry science energy and resources australia. <https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list>
- Bridging Document between CIRSCO and UNFC. (2015). UNECE. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revise_d_CIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf
- Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration (2020). Natural Resources Canada. News release. Ottawa, Ontario. <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration.html>
- Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D. et al. (2023) Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/386650>.
- Critical Materials Assessment 2023. (2023). U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf
- Critical Minerals. Geoscience Australia. (2023). <https://www.ga.gov.au/about/projects/resources/critical-minerals>
- ECE/ENERGY/GE.3/2021/10: Draft United Nations Resource Management System: Provisional structure and guidelines. (2021). Geneva: Economic and Social Council of United Nations. https://unece.org/sites/default/files/2021-04/ECE_ENERGY_GE.3_2021_10_UNRMS.pdf
- ECE/ENERGY/GE.3/2022/6: Draft United Nations Resource Management System: Principles and Requirements. (2022). Geneva: Economic and Social Council of United Nations. https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE_ENERGY_GE.3_2022_6.pdf

Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. *Final Report*. DG GROW, European Commission. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54114/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.

International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. (2019). Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards. International Council on Mining & Metals. https://www.criirco.com/docs/CRIRSCO_International_Reporting_Template_November_2019.pdf

Isetani, S., Shimizu, S., DeWit, A., & Shaw, R. (2022). Indo-Japanese Collaboration on Energy Security and Critical Raw Materials (CRM) *The Asia-Pacific Journal*, 20, 18(5), 1–32. <https://apjif.org/2022/18/Isetani-Shimizu-DeWit-Shaw.html>

Methodology for Establishing the EU List of Critical raw Materials. Guidelines, (2017) European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>

Nakano, J. (2021). *The geopolitics of critical minerals supply chains*. Washington, DC. Center for Strategic & International Studies. <https://www.jstor.org/stable/resrep30033.8>

Report on Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. (2014). European Commission, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/10010/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>

Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Seal, R. R., & Bradley, D. C. (Eds.). (2017). Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802. https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802_entirebook.pdf

UNFC United Nations Framework Classification for Resources (UNFC). (2019). https://unece.org/sites/default/files/2020-12/E_ECE_ENERGY_109_WEB.pdf

References

Australia's Critical Minerals List. (2023). Department of industry science energy and resources australia. <https://www.industry.gov.au/publications/australias-critical-minerals-list>

Balega, A., Vyzhva, S., & Kurylo, M. (2018). Institutional provision of geological study and use of subsoil: national and international exploration. *Vysnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(83). 63–72 [in Ukrainian].

Bariatska, N. (2020). The concept of critical minerals as a mean of stimulate the development of subsoil use in Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 13–19 [in Ukrainian].

Bridging Document between CRIRSCO and UNFC. (2015). UNECE. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf

Canada and U.S. Finalize Joint Action Plan on Critical Minerals Collaboration (2020). Natural Resources Canada. News release. Ottawa, Ontario. <https://www.canada.ca/en/natural-resources-canada/news/2020/01/canada-and-us-finalize-joint-action-plan-on-critical-minerals-collaboration.html>

Carrara, S., Bobba, S., Blagoeva, D. et al. (2023) Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU – A foresight study. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/386650>

Classification of reserves and resources of minerals of the State Fund of Subsoil. (1997). Approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 432 of 05.05.97. *Official Gazette of Ukraine*, 19, 104.

Critical Materials Assessment 2023. (2023). U.S. Department of Energy. https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-07/doe-critical-material-assessment_07312023.pdf

Critical Minerals. Geoscience Australia. (2023). <https://www.ga.gov.au/about/projects/resources/critical-minerals>

ECE/ENERGY/GE.3/2021/10: Draft United Nations Resource Management System: Provisional structure and guidelines. (2021). Geneva:

Economic and Social Council of United Nations. https://unece.org/sites/default/files/2021-04/ECE_ENERGY_GE.3_2021_10_UNRMS.pdf

ECE/ENERGY/GE.3/2022/6: Draft United Nations Resource Management System: Principles and Requirements. (2022). Geneva: Economic and Social Council of United Nations. https://unece.org/sites/default/files/2022-04/ECE_ENERGY_GE.3_2022_6.pdf

Grohol, M., & Veeh, C. (2023). Study on the Critical Raw Materials for the EU. *Final Report*. DG GROW, European Commission. <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/54114/attachments/1/translations/en/renditions/native>

Hund, K., La Porta, D., Fabregas, T. P., Laing, T., & Drexhage, J. (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. International Bank for Reconstruction and Development. The World Bank.

International Reporting Template for the Public Reporting of Exploration Targets, Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves. (2019). Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards. International Council on Mining & Metals. https://www.criirco.com/docs/CRIRSCO_International_Reporting_Template_November_2019.pdf

Isetani, S., Shimizu, S., DeWit, A., & Shaw, R. (2022). Indo-Japanese Collaboration on Energy Security and Critical Raw Materials (CRM) *The Asia-Pacific Journal*, 20, 18(5), 1–32. <https://apjif.org/2022/18/Isetani-Shimizu-DeWit-Shaw.html>

Methodology for Establishing the EU List of Critical raw Materials. Guidelines, (2017) European Commission. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2d43b7e2-66ac-11e7-b2f2-01aa75ed71a1>

Mineral resources of Ukraine. (2021). Development Enterprise "Geological information fund of Ukraine" [in Ukrainian].

Nakano, J. (2021). *The geopolitics of critical minerals supply chains*. Washington, DC. Center for Strategic & International Studies. <https://www.jstor.org/stable/resrep30033.8>

Portfolio of critical raw materials of Ukraine. (2023). State Service of Geology and Subsoil of Ukraine [in Ukrainian]. <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/critical-minerals-portfolio-ua.pdf>

Regulations on the procedure for conducting state examination and assessment of mineral reserves. (1994). Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 22.12.1994 No. 865 [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/865-94-%D0%BF%Text>

Report on Critical Raw Materials for the EU. Report of the Ad hoc Working Group on defining critical raw materials. (2014). European Commission, <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/10010/attachments/1/translations/en/renditions/pdf>

Rudko, G. I., & Bala, G. R. (2021). Critical mineral raw materials and their prospects in Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 3–13 [in Ukrainian].

Rudko, G. I., Lytvyniuk, S. F., Karly, V. E., & Bala, H. R. (2021). Deposits of critical mineral raw materials of Ukraine. Conditional and prospects. Bukrek [in Ukrainian].

Rudko, G. I., Netskyi, O. V., Nazarenko, M. V., & Khomenko, S. A. (2012). National and international systems of Mineral Resources Classification: state and perspectives of alignment. "Bukrek" [in Ukrainian].

Schulz, K. J., DeYoung, J. H., Seal, R. R., & Bradley, D. C. (Eds.). (2017). Critical mineral resources of the United States – Economic and environmental geology and prospects for future supply: U.S. Geological Survey Professional Paper 1802. https://pubs.usgs.gov/pp/1802/pp1802_entirebook.pdf

State Balance of Mineral Reserves of Ukraine. (2021). State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, State Research and Development Enterprise "Geological information fund of Ukraine" [in Ukrainian].

UNFC United Nations Framework Classification for Resources (UNFC). (2019). https://unece.org/sites/default/files/2020-12/E_ECE_ENERGY_109_WEB.pdf

Vyzhva, S., Kurylo, M., & Balega, A. (2018). Main tools of state planning and financial support of geological studies in Ukraine. *Vysnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(83). 63–72 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 17.06.23

Прорецензовано / Revised: 31.08.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Stanislav LYTUVYNIUK, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

State Commission of Ukraine on Mineral Resources, Kyiv, Ukraine

Natalia BARIATSKA, DSc (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-8068-2464

e-mail: BariatskaN@gmail.com;

Softmine LLC, Kyiv, Ukraine

METHODOLOGICAL APPROACHES FOR DETERMINATION AND ASSESSING THE RESOURCE POTENTIAL OF CRITICAL RAW MATERIALS IN UKRAINE

Industrial and technological interest in critical (strategic) mineral raw materials, given their natural scarcity, is of key importance in the global economy. A country's (or region's) supply of raw materials is a factor of economic security, autonomy and an insurance against global crises. Global and regional analytical researches on the mineral resource assessment in the context of circular and resource efficient (low-carbon) economy development have revealed a number of problematic issues related to different methodological approaches to the assessment, classification, accounting and management of critical mineral raw materials (CRM). The standardization of such approaches for economically related regions is the way to create reliable critical mineral raw material supply chains and ensure sustainable economic development.

In order to complete the outlined tasks, a wide range of studies has been used, including general scientific and special methods of scientific and applied research. In addition to general theoretical methods of analysis, statistics and systematization, a complex of methods of geological and technical-economic study of mineral raw materials has been used to achieve the set goal and complete specified tasks.

Authors have attempted to define the concept of critical mineral raw materials by using basic criteria and methodical approaches of the United Nations Framework Classification (UNFC).

Various classification systems used for the assessment and management of critical mineral raw materials have been considered. Practical experience of the UNFC application during the assessment of CRM resource potential in Ukraine (excluding hydrocarbons and groundwater) based on the list of the European Union has been presented. Considering the current state of the mineral raw material resource base of Ukraine, authors have suggested methodological tools for bringing the State Balance into compliance with the integrated systematic accounting in accordance with the UNFC.

The analysis of the State Balance of Ukraine using the UNFC approaches has revealed primary prospects for the mineral and raw material base development, which are related to potential and perspective projects on 22 elements from the EU list of critical mineral raw materials. Ukraine possesses all the prerequisites to participate in European Union programs designed to create sustainable models of supply chains for various resources for the transition to closed-cycle zero waste consumption.

Keywords: *critical raw materials, mineral resource management, categories, classification principles, United Nations Framework Classification (UNFC), United Nations Resource Management System (UNRMS).*

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК [502.51:504.5]:628.4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.11>

Володимир ЄМЕЛЬЯНОВ¹, д-р геол.-мінералог. наук, чл.-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0002-8972-0754
e-mail: eva@nas.gov.ua

Євген НАСЕДКІН², канд. геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0003-2633-9291
e-mail: nasedevg@ukr.net

Олена ІВАНІК³, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-8782-4883
e-mail: om.ivanik@gmail.com

Тамара КУКОВСЬКА¹, канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-7532-8885
e-mail: t.kukovska@gmail.com

Володимир ЮХИМЧУК⁴, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5218-9154
e-mail: v.yukhymchuk@gmail.com

Олександра МИТРОФАНОВА¹, асп.
ORCID ID: 0000-0001-5971-9122
e-mail: mitrof_ol@ukr.net

¹Центр проблем морської геології, геоелекології та осадового рудоутворення
НАН України, Київ, Україна

²Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

³Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

⁴Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ МАКРО- ТА МІКРОПЛАСТИКУ В МЕЖАХ ПЛЯЖЕВИХ ЗОН ВНУТРІШНЬОКОНТИНЕНТАЛЬНИХ МОРІВ (НА ПРИКЛАДІ ПЛЯЖЕВОЇ ЗОНИ М. ЮЖНЕ, УКРАЇНА)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. спів роб. О.Л. Шевченком)

Вступ. Приміські пляжі в межах українського узбережжя північно-західного шельфу Чорного моря, зважаючи на щільність промислової та соціально-побутової інфраструктури, наближеність до впадіння в море великих водних артерій із значними водозбірними територіями, є достатньо показовими об'єктами для проведення режимних досліджень розподілу пластикового сміття та мікропластику в компонентах довкілля.

Методи. Визначено закономірності розподілу пластикового сміття та мікропластику в межах прибережної зони північно-західної частини Чорного моря на прикладі тестових ділянок м. Южне (Одеська обл., Україна). Для аналізу кількісних та якісних характеристик синтетичних полімерів та з'ясування особливостей їх формування, розподілу та надходження в межах пляжної зони додатково використано метод фільтрації зворотних хвильових потоків. Виконано візуальний аналіз розподілу пластикових об'єктів і фрагментів та визначено їхні типи за допомогою Раман-спектроскопії.

Результати. Спектроскопічні дослідження засвідчили, що в переважній більшості відібрані зразки макро- та мікропластику представлені поліпропіленом, поліетиленом та полістиролом. Підтверджено, що основна частина пластику має високу міграційну здатність у межах прибіжних ділянок, що визначається переносом водними потоками в періоди хвильової активності та відсутністю сталої компоненти в товщі піску в межах пляжу. Визначено, що для різних категорій розмірності пластикових фрагментів кардинально змінюється їх видовий склад. Полімерні синтетичні об'єкти розміром понад 1 см представлені переважно поліпропіленом, полістиролом та виробами з поліетилену високої щільності. В категорії більш дрібної розмірності пластикових фрагментів розширюється як спектр видів полімерів, так і їх належність до різних економічних сфер використання. Синтетичні волокна, що становлять більшість об'єктів найдрібнішої гранулометричної фракції – менш як 0,1 мм – присутні повсюдно і в значній кількості.

Висновки. Дослідження засвідчують, що параметри берегової лінії (ширина, довжина, нахил, форма, наявність рослинності, антропогенна змінність), гідродинамічні процеси та геологічна будова берегової зони мають суттєвий вплив на формування умов накопичення макро- та мікропластиків. Для подальшого дослідження факторів впливу на засмічення пластиковими об'єктами та мікропластиком пляжної зони необхідні моніторингові дослідження в межах представлених тестових ділянок.

Ключові слова: забруднення, пластикове сміття, мікропластик, Чорне море, прибережна зона, літодинаміка.

Вступ

В умовах повномасштабних військових дій в Україні морські пляжі поки що залишаються одним з небагатьох доступних для вивчення елементів середовища морських геоекосистем. Проводити повноцінні комплексні дослідження в акваторіях Чорного та Азовського морів нині неможливо. Крім того, пляжні зони можна вважати однією з показових складових природних комплексів субсистем ділянок зчленування "суходіл-море", зокрема в контексті спостережень розподілу

пластикового сміття та мікропластиків у морських геоекосистемах.

По-перше, пляжі – це природні території, де відбувається накопичення пластикових відходів загалом, а також часткова акумуляція мікропластиків завдяки процесу інтенсивної сепарації та перевідкладення в хвилеприбіжній зоні речовини, яка перебуває в товщі чи на поверхні водного шару акваторій. По друге, соціальний статус пляжів Чорноморського басейну як зон активного

відпочинку дає змогу розглядати їх як первинне джерело емісії пластику в природне середовище.

Крім того, у межах пляжів відбувається не тільки акумуляція та сепарація пластикового сміття, але й активна деградація цього продукту антропогенної діяльності. Згідно з A.L. Andrady (Andrady, 2011) на відміну від пластиків, що перебувають у товщі води, на її поверхні або у складі донних відкладів, пластики у межах пляжних зон зазнають: 1) інтенсивного впливу ультрафіолетового випромінювання; 2) температурних перепадів (як добових, так і сезонних); 3) впливу кисневого середовища (повітря); 4) інтенсивного механічного подрібнення та стирання в періоди різного ступеня хвильової активності та 5) біологічного та мікробіологічного впливу.

Міжнародний досвід досліджень цього типу забруднення в межах територій пляжів акваторії Чорного моря достатньо різноманітний, але не системний. Зокрема, в публікації M. Şener із співавторами (Şener, Doğruyol, & Balkaya, 2019) висвітлюються результати досліджень забруднення пластиком піщаних пляжів узбережжя Чорного моря з анатолійської сторони міста Стамбул. Румунські науковці (Savusa et al., 2017) провели дослідження забруднення відкладів Чорноморського узбережжя Румунії мікропластичними волокнами. Склад та чисельність антропогенного сміття досліджувались також на прилеглих прибережних пляжах трьох річок, що впадають у Північно-Західне та Південне Причорномор'я (Aytaç, Pogojeva, & Simeonova, 2020).

Окремі методичні розробки (Kershaw, Turra, & Galgani, 2019) визначають важливим природним елементом для здійснення моніторингу пластикового сміття та мікропластику хвилеприбірні ділянки узбережжя, відзначаючи такі властивості пляжів, як:

- місце накопичення (концентрування) морського сміття завдяки хвилеприбірній діяльності моря та розподілу течій;

- ділянку акваторії, найбільш наближену до наземних джерел утворення пластикового сміття та мікропластику.

Отже, виходячи із зазначеного вище, приміські пляжі в межах українського узбережжя північно-західного

шельфу Чорного моря, зважаючи на щільність промислової та соціально-побутової інфраструктури, наближеність до впадіння в море великих водних артерій із значними водозбірними територіями, є достатньо показовими об'єктами для проведення режимних досліджень розподілу пластикового сміття та мікропластику в компонентах довкілля. Аналіз пластику в межах берегових ліній визначає економічно ефективний підхід до моніторингу тенденцій його розподілу, незважаючи на динамічність природних факторів (за умови врахування мінливості системи).

Обґрунтування вибору ділянки досліджень за фізико-географічними умовами. Аналіз результатів досліджень пластиків (Kershaw, Turra, & Galgani, 2019; Andrady, 2011; Falahudin et al., 2020; Constant et al., 2020) показує, що під час вибору та обґрунтування ділянок спостережень за розподілом компонентів пластикових відходів (зокрема, мікропластику) потрібно враховувати як загальногеографічні аспекти розташування територій досліджень, так і ландшафтну та геоморфологічну різноманітність локальних природних середовищ у межах станцій пробовідбору.

Під час вибору ділянки спостережень у загальногеографічному аспекті ключовим фактором було завдання мінімізації кількості джерел впливу на можливе насичення об'єкта досліджень пластиком сміттям і мікропластиком.

Визначена спостережна ділянка – міський пляж м. Южне – розташовується в центрі узбережжя північно-західного шельфу Чорного моря, недалеко від місця розвантаження вод Дніпровсько-Бузького лиману. Водночас промислово навантажений регіон (м. Одеса, портові комплекси, місця дночерпання та дампування) в районі Одеської затоки знаходиться близько 50 км західніше від обраної ділянки. Розподіл течій у частині акваторії, прилеглої до м. Южне, визначається цілорічним впливом розприснених вод, що надходять з гирла Дніпровсько-Бузького лиману та формують стійкий потік у межах цієї частини шельфу в південно-західному напрямку.

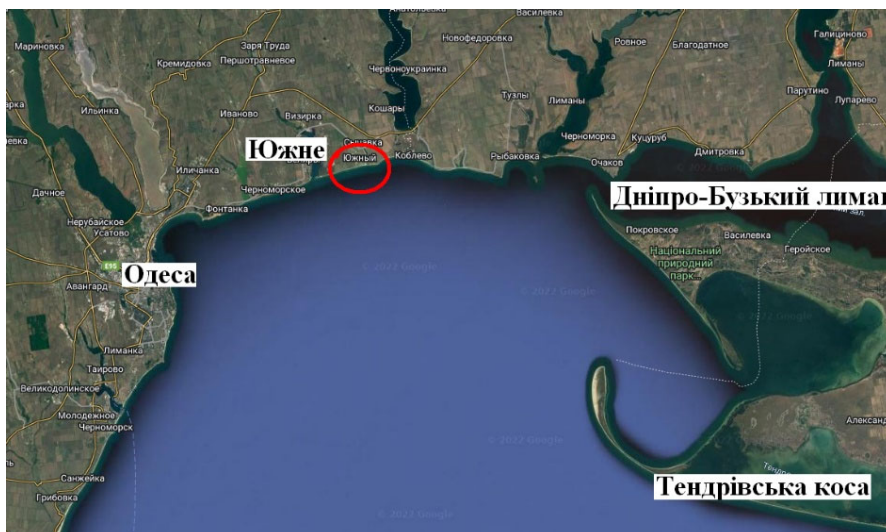


Рис. 1. Розташування ділянки досліджень (червоне коло) в межах узбережжя північно-західного шельфу Чорного моря

Помірно континентальний клімат району досліджень з рисами субтропічного, м'яка зима, тепле і довге літо визначають туристичну привабливість міста, та ділянки досліджень, зокрема м. Южне, в межах якого розташо-

ваний досліджуваний пляж. Воно є одним із наймолодших міст Одеської області із населенням понад 33 тис. осіб, в семи кілометрах на захід від якого розташований морський торговельний порт "Південний" та Одеський

припортовий завод. Відстань до обласного центру – м. Одеса становить близько 47 км. Також західніше від міста збудовано морський нафтовий термінал "Південний", з якого починається нафтогін Одеса–Броди. Необхідно зазначити, що більшість комунальних і промислових осередків в межах чорноморського узбережжя, які можуть мати суттєвий вплив на надходження пластикового сміття та мікропластику, розташовані західніше від м. Южне. Останнє свідчить про мінімальний можливий їхній внесок у забруднення пластиком досліджуваної ділянки, зважаючи на розподіл течій у районі акваторії, де найвпливовішим фактором є розвантаження в акваторію річкових вод з Дніпровсько-Бузького лиману на схід від міста.

З літературних джерел (Kershaw, Turra, & Galgani, 2019) відомо, що параметри берегової лінії (ширина, довжина, нахил, форма, наявність рослинності, антропогенна змінність) мають суттєвий вплив на формування умов накопичення пластиків та мікропластиків. Узбережжя зазвичай дуже динамічні через поєднання океанографічних (припливи, хвилі та течії) та метеорологічних (вітри та осадки) процесів. Також на характер берегової лінії впливають геологічні фактори, що визначають її тип, склад та потужність порід. Все це зумовлює розподіл, чисельність та види морського сміття, їх мінливість у просторі та часі.

Щодо літологічних особливостей поверхневої осадової товщі, то досліджувана ділянка складається з двох типів покриву:

- безпосередньо міський пляж із привнесеного насипного піску, представленого середньо-крупнозернистою гранулометричною фракцією, забрудненість якого має візуально контролюватись комунальними службами міста;
- природні пляжі, складені дрібнозернистим піском та алевритовою складовою, що утворюються завдяки абразії берегових уступів.

Типи берегового уступу ділянки досліджень належать за класифікацією НДУ "Український науковий центр екології моря" (Український та ін., 2018) до корінних абразійних кліфів, а потужність вторинного замулення прибережної донної поверхні, представлені піском, мулом та черепашником, сягає 5 см (рис. 2). Пляжний профіль може бути змінений сильним хвилюванням, що може поховати або виявити сміття, але це відбувається нечасто і переважно в холодний період року. Вважається, що для району досліджень активне осадження тонкодисперсної речовини викликане зниженням інтенсивності стоку вод Дніпровсько-Бузького лиману, а для частини акваторії на захід – також активною господарською діяльністю (портове господарство, прибережне будівництво, судновий вантажний потік, дампінг ґрунтів, рибний промисел тощо).

Отже, беручи до уваги напрямки прибережних течій, особливості рельєфу та морфологію узбережжя, основні джерела надходження синтетичних полімерів за ступенем антропогенного навантаження на берегову лінію в межах території досліджень, варто обмежити:

- 1) транзитним привнесенням з водозбірних територій річок Дніпро та Південний Буг, зважаючи на близькість до створів річок – потенційних транзитерів пластикового сміття та мікропластику;
- 2) надходженням з побутових джерел міського осередку (пляжів зони культурного відпочинку, звалища в межах та недалеко від узбережжя, стічні води).

Водночас слід зазначити, що басейн р. Дніпро налічує 15381 малу річку (67,2 тис. км) і займає найбільшу серед інших річок країни площу – 48,5 % території України. Басейн Південного Бугу охоплює 10,6 % території України,

до басейну належить 6638 малих річок загальною довжиною 20,1 тис. км. Такі показники мають суттєвий вплив на виник антропогенної речовини, і зокрема синтетичних полімерів, у межі акваторії Чорного моря (рис. 3).

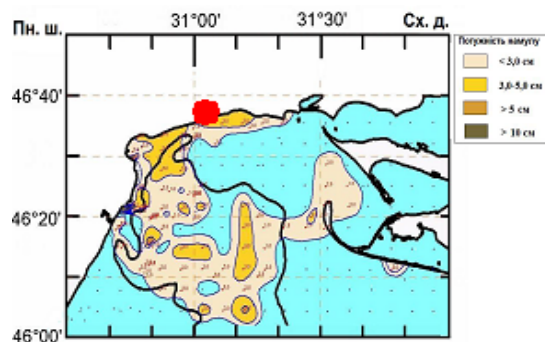


Рис. 2. Просторовий розподіл зон вторинного замулення донної поверхні моря в Дніпровсько-Бузькому районі північно-західної частини Чорного моря (червоне коло – район проведення досліджень) (Український та ін., 2018)

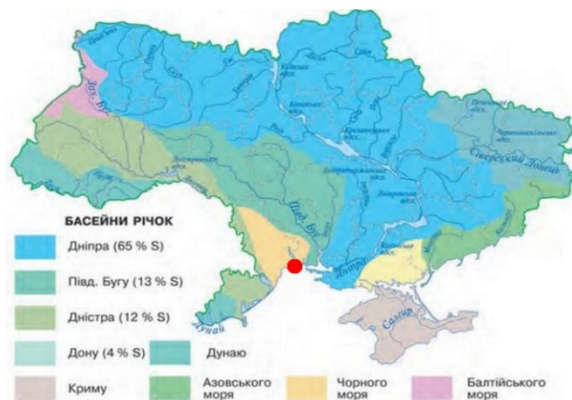


Рис. 3. Схема водозбірних територій України (червоне коло – район проведення досліджень)

Методи

Методика відбору, підготовки та аналізу проб.

Відбір проб проводився двома способами, один з яких є традиційним для досліджень з виявлення мікропластику та пластикових фрагментів у піщаних наносах. Зокрема, проби піску відбирались відповідно до усталених методик (Löder, Gerds, 2015).

За відсутності відчутних припливно-відливних явищ у Чорному морі акценти відбору було зроблено на:

- 1) різних ділянках хвилеприбірної зони; проби відбирались в 1 та 7 метрах перпендикулярно до кромки води;
- 2) типах узбережжя, відмінних у геоморфологічному плані; проби відбирались із середини пологого міського пляжу (рис. 4, т. 2), вузької природної ділянки пляжу в межах корінного абразійного кліфу (рис. 4, т. 3) та перехідної ділянки (рис. 4, т. 1).

Відбір проб за класичною схемою проводився металевою лопаткою на глибині 5 см з різних літологічних типів поверхневої осадової товщі, зокрема в межах основної ділянки міського пляжу, представлених середньо-крупнозернистим піском, та природних пляжів на межі та за межами муніципальної території, складених дрібнозернистим піском з алевритовою складовою, що утворюються завдяки абразії берегових уступів.

Об'єм піску в кожній пробі становив 1 дм³, протягом двох років було відібрано 12 зразків упродовж літнього періоду (червень–липень) (Ємельянов та ін., 2021).



Рис. 4. Карта-схема відбору проб на ділянці досліджень:

1 – перехідна ділянка, 2 – середина лінійного тіла міського пляжу, 3 – корінний абразійний кліф

Другий тип відбору зразків мав нестандартний характер та був зумовлений такими об'єктивними факторами, як вкрай незначна кількість мікропластику, що фіксувалася в пробах піску, відібраних традиційними методами, роком раніше. Водночас візуальна оцінка розподілу частинок пластику та залишків пластикових виробів у межах пляжу вказувала на достатню їх кількість для повноцінного відбору на ділянці досліджень (Смельянов та ін., 2021). Цей метод відбору ґрунтувався на натурному процесі переведення в завислий стан та виносу речовини з денної поверхні пляжу площинним зливом, зокрема зворотними хвильовими водотоками в межах визначених ділянок відбору. Для цього було використано устаткування, за принципом дії схоже на трали для відбору зразків мікроорганізмів, зокрема планктону, з водної товщі (трал "Манта" та ін.). Як фільтрувальна тканина використовувалося поліамідне полотно Saatifil PA з розміром чарунки 0,016 мм (16 мікрон). Зворотні водні потоки виносили найменш щільну дисперсну складову з поверхні пляжу в напрямку урізу води (рис. 5). Вона була представлена, в порядку зменшення кількості, мінеральною компонентою алевритової розмірності (кварцовий пісок та детрит бентосних молюсків), личинками та залишками комах, дрібними шматочками деревини, фрагментами водної рослинності та пластиковими частинками різної розмірності. У міру накопичення приблизно 20 л води у фільтрувальній ємності відбір завершувався, відібрана рідина поступово профільтрувалась через полотно, а накопичений осадок відбирався для подальших лабораторних досліджень. Довжина пляжу (перпендикулярно лінії прибою), дренажена зворотними водами хвильових збурень, сягала 4 м, при цьому дослідження проводились на трьох вищезазначених ділянках.

У подальшому проби у скляній тарі доставляли в лабораторію ДНУ "МорГеоЕкоЦентр НАН України", де проходили процедуру сепарації мінеральної природної речовини від мікропластику та твердих органічних решток шляхом витримки в розчині хлористого цинку, що дало змогу завдяки щільності розчину, майже в два рази вищої за щільність води, найбільш повно забезпечити відбір фрагментів синтетичних полімерів різного хімічного складу. Етапи лабораторної підготовки та обробки проб сепарацією їх у концентрованому розчині хлористого цинку ($ZnCl_2$) (рис. 6) виконувались відповідно до

рекомендацій (Imhof et al., 2012). Це дозволило залучити до ідентифікації та оцінки групу мікропластиків, щільність яких перевищує щільність морської води, і які під час сепарації з використанням NaCl зазвичай залишаються у складі мінеральної компоненти (поліестр, поліуретан, поліамід, полістирол та ін.).

Наступним етапом після гравітаційного розподілу була мінімізація кількості природної органічної складової завислої речовини, шляхом відстоювання в концентрованому розчині перексиду водню 60 %. Операція дала змогу частково вилучити органічні залишки шляхом їх розчинення та обезбарвити ті, що залишились (рис. 7).

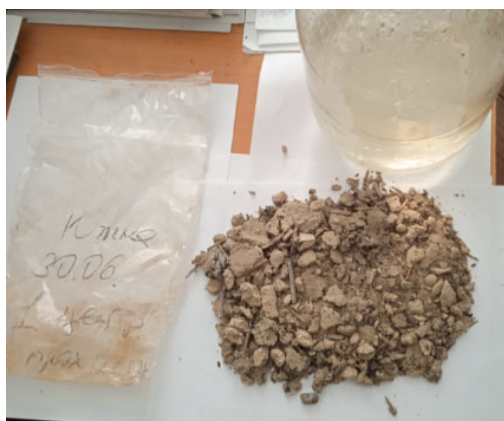


а



б

Рис. 5. Процес відбору проб зі зворотних хвильових потоків (а) та подальшої сепарації (б) через фільтрувальну тканину



а



б

Рис. 6. Лабораторна підготовка та обробка проб сепарацією в концентрованому розчині хлористого цинку ($ZnCl_2$): суха проба натурної речовини, загальний вигляд до переданалітичної підготовки (а); процес сепарації речовини в розчині хлористого цинку (б)

В подальшому проби промивали у дистильованій воді та висушували.

Після просушки відібраних проб зразки направляли на лабораторні дослідження, що включали такі основні етапи:

- 1) візуалізація та відбір фрагментів мікропластику, які можна напевно ідентифікувати за зовнішніми ознаками;
- 2) вилучення з проб органічних решток, яких виявилася значна кількість – понад 95 % обсягів проб, попередньо відсепарованих у розчинах $ZnCl_2$ та H_2O_2 ;

3) дослідження частинок мікропластику під бінокулярним МБС-9 та їх фотофіксація. Візуальна оцінка під мікроскопом МБС-9 відбувалась за низкою представлених у літературних джерелах методик, основними показниками – ідентифікаторами були колір, співвідношення лінійних розмірів та морфологія частинок. Це дало змогу виявити низку фрагментів пластику, а також частинок мікропластику (менш як 0,5 мм);

4) визначення неідентифікованих частинок за допомогою Раман-спектроскопії, що проводилось на апаратурній базі відділу оптики і спектроскопії Інституту фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. Зокрема, в дослідженнях було задіяно однокаскадний спектроскоп MDR-23, оснащений охолоджуванним детектором CCD (Andor iDus 420, Велика Британія) та мікроскопом "Micromed". Раманівські спектри збуджувалися випромінюванням твердотільних лазерів з довжинами хвиль 457 нм, 532 нм, 671 нм та 785 нм.



1



2



3

Рис. 7. Процес розчинення органічної речовини в перексиді водню та промивки в дистильованій воді: 1,2 – початковий етап відстоювання проби в концентрованому розчині перексиду водню 35 %; 3 – вигляд відсепарованої висушеної проби. Більша частина фрагментів – залишки комах та їхні личинки, дрібні уламки деревини

Результати

Під час розгляду та систематизації результатів було використано класифікацію Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA) щодо розмірності пластикових відходів (Arthur, Baker, & Bamford, 2009; Collignon et al., 2014). Зокрема, мікропластик визначався як фрагменти будь-якого типу пластику з розміром менш як 5 мм (0,20 дюйма), що утворюються в результаті деградації пластикових виробів і спричиняють забруднення, потрапляючи в природні екосистеми з різних джерел (косметика, одяг, харчова упаковка та промислові процеси). Інша вагома складова пластикового сміття, відібраного на ділянці досліджень, це – фрагменти

чи вироби із синтетичних полімерів, розмір яких перевищує 5 мм. Більшість таких об'єктів, за результатами нашого пробовідбору, не перевищувала за розміром 5 см.

Попередньо зауважимо, що аналіз типів пластикових полімерів за допомогою спектроскопії було застосовано з огляду на те, що під час візуального аналізу більшість частинок може бути помилково ідентифікована як пластмаси.

Результати спектрографічних досліджень засвідчили, що в основній більшості відібрані зразки пластикових фрагментів, які можна ідентифікувати візуально, представлені поліпропіленом, поліетиленом і полістиролом. Розподіл спектрів (рис. 8) свідчить, що раманівські смуги накладаються на широкую смугу фотолюмінесценції, але здебільшого реєструються добре.

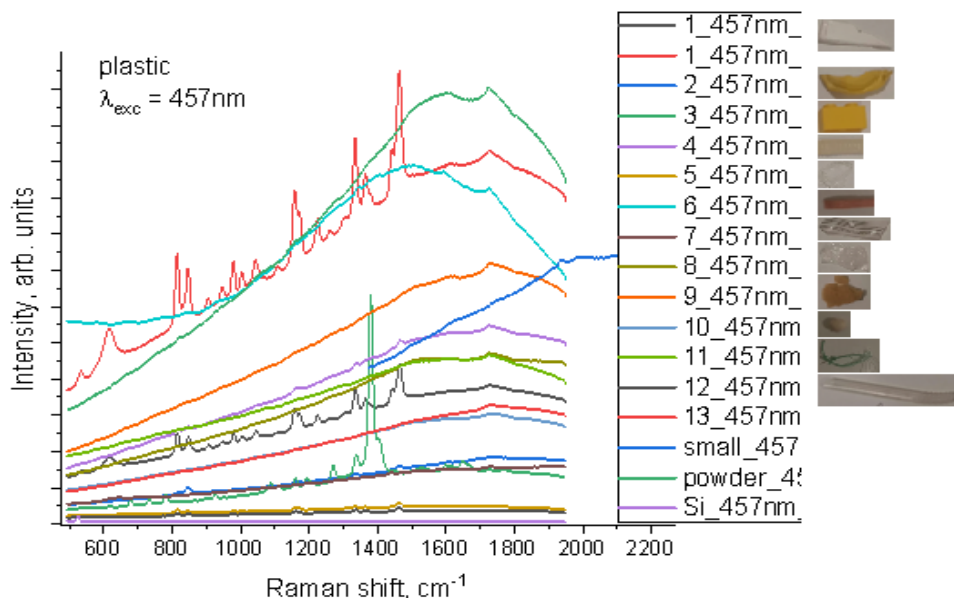


Рис. 8. Раманівські спектри для деяких частинок пластику, відібраних у ході досліджень, із використанням установки на базі спектрометра ДФС-52

Разом з тим суттєва кількість попередньо відібраного матеріалу, визначеного під мікроскопом з великою вірогідністю як пластик, у процесі ідентифікації спектроскопією виявилась твердими органічними рештками рослинного чи тваринного походження, що не зазнали деструкції на стадії обробки пероксидом водню. Так чи інакше, інтенсивність фотолюмінесценції в ході лабораторних вимірювань не дала змогу ідентифікувати майже 50 фрагментів у розмірності 0,5–0,1 мм як синтетичні полімери.

Узагальнення досліджень засвідчило низку фактів, зокрема:

1. Дослідження проб піску за стандартними процедурами відповідно усталеним методикам з різних ділянок пляжу виявили такі особливості:

а) повна відсутність частинок пластику розміром понад 5 мм;

б) домінування фрагментів синтетичних матеріалів, представлених волокнами різної довжини (до 5 мм) та кольору (рис. 9), з поперечним перерізом 10–50 мкм. За хімічним складом волокна відповідають переважно поліпропілену, поліестерам та поліамідам, спостерігаються також одиничні екземпляри кульок пінополістиролу (рис. 10).



Рис. 9. Волокна різного виду і кольору, відібрані за усталеною схемою пробовідбору із зразків піщаного матеріалу в межах міського пляжу м. Южне

Доволі широку присутність волокон поліестеру в пробах піщаного матеріалу, відібраного традиційним методом, можливо пояснити такими факторами:

1) відносна міцність поліестеру до механічних впливів, він стійкий до дії світла, деструкції мікроорганізмами, руйнування під дією водного середовища;

2) висока питома щільність матеріалу – понад 1,3 г/см³, що дає змогу закріплюватись у піщаних наносах і запобігати винесенню в море в періоди хвильової активності.

Очевидно, що джерела надходження цього виду мікропластиків мають побутовий характер, а шляхами надходження можуть бути як транзитні, так і місцеві водні потоки.

Щодо наявності незначної кількості частинок, представлених пінополістиролом з виробів невизначеного генезису, можна припустити таке. Зважаючи на значну кількість фрагментів безпресового пінополістиролу, відібраних у межах ділянки досліджень іншим методом (описаний нижче), можна вважати, що сфера застосування

первинних виробів і їх походження – будівництво чи сфера послуг (пакувальний матеріал). Водночас їх відносно висока щільність і темний колір, вірогідно, зумовлюються хімічним впливом морської води, тривалим перебуванням у межах гідродинамічно активної зони та впливом сонячної радіації.

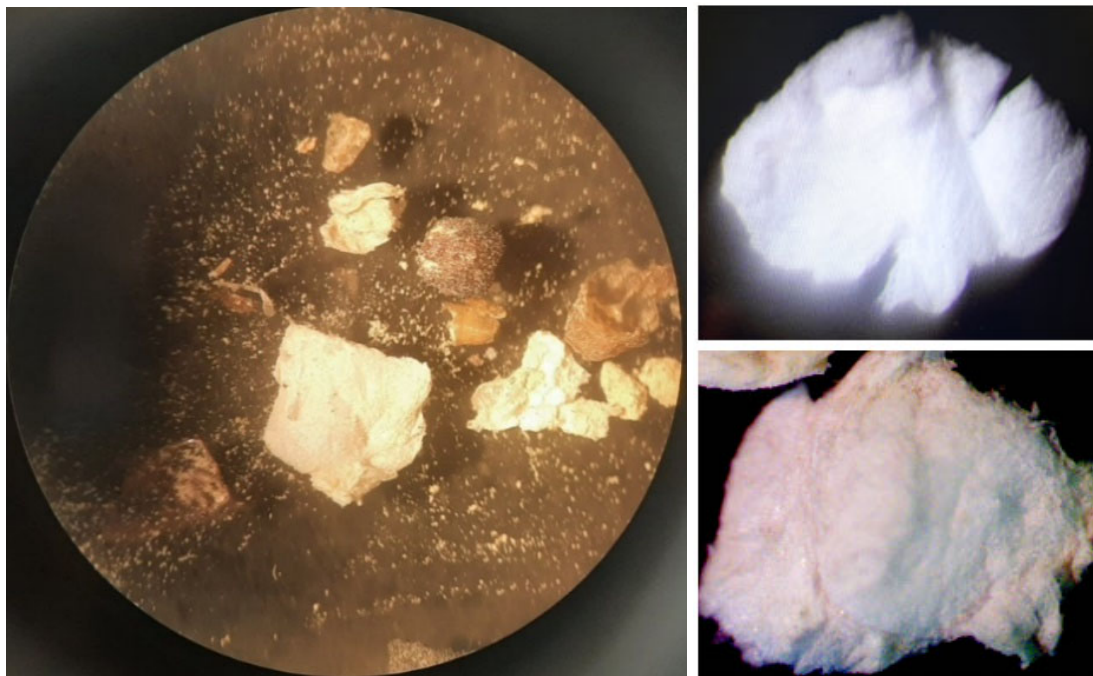


Рис. 10. Частинки, представлені пінополістиролом із зразків піщаного матеріалу в межах міського пляжу м. Южне (фото із різним збільшенням)

Отже, можна констатувати, що дослідження засвідчили низьку інформативність пробовідбору в межах міського пляжу Южного за усталеною в літературних джерелах схемою суцільного відбору зразків поверхневого шару піщаних відкладів з подальшою лабораторною сепарацією мінеральної та органічної складових.

2. Метод **фільтрації потоків води поверхневого стоку** досліджень виявився значно ефективнішим – кількісні та якісні характеристики відібраного синтетичного матеріалу засвідчили низьку особливостей його утворення, розподілу та надходження в межі пляжу. По-перше, порівняння компонентного складу основних груп за розміром вказує на домінування за кількісним показником частинок розміром менш як 0,5 мм. Одночасно за загальним обсягом відібраного матеріалу більшість становлять фрагменти пластику та пластикові вироби, розмір яких (в одній з площин) перевищує 0,5 мм. Слід зазначити, що поділ за розміром є досить умовним, зважаючи на значну кількість лінійних об'єктів і таких, що мають нещільну структуру і можуть дробитись чи розкладатись у процесі підготовки проб до досліджень.

За хімічним складом більшість частинок – похідні виробів з поліетилену чи поліпропілену і мають відповідну щільність нижчу за одиницю. Спектр виробів чи фрагментів виробів, щільність яких сягає більше одиниці, достатньо значний – це рибальські приладдя, елементи іграшок, а також фрагменти одягу та м'яких меблів (поролон). Суттєвий сегмент у відібраних пробах займають також полімери, що належать до утворених з природних

(несинтетичних) компонентів – цигаркові фільтри різного ступеня розкладання, що складаються з оцтового ефіру целюлози. Одиначні елементи проб – гумові вироби чи їх фрагменти, основу яких становить каучук, також не можна відносити до класу синтетичних матеріалів.

З ідентифікованих фрагментів чи цілих виробів за господарським призначенням більшість належить до галузі харчової промисловості, особливо в розмірній групі >0,5 мм.

Нижче в зведених таблицях (табл. 1, 2) представлено найтипівіші фрагменти чи вироби з пластику, що було безпосередньо відібрано методом фільтрації зворотних хвильових потоків у межах трьох точок відбору проб пляжу м. Южне.

Аналіз розподілу фрагментів пластику відносно точок пробовідбору в межах різних ділянок пляжу засвідчив загальну тенденцію збільшення їх кількості та різноманіття в центральній частині (за вищенаведеною схемою). Такий закономірності, судячи з об'єктивних причин, є два пояснення, які не дають змогу визначити найвпливовіший фактор та взаємовиключають впливи одне одного. Зокрема, це можна розглядати як прямий зв'язок між ступенем засмічення пляжу та кількістю відпочивальників, а також як зміни природних факторів розподілу осадової речовини у хвилеприбійній зоні. Останнє пов'язане з наближенням периферійних ділянок відбору до абразійних кліфів, а також зміною гранулометричного складу піску на більш дрібнодисперсний порівняно із центральною частиною пляжу.

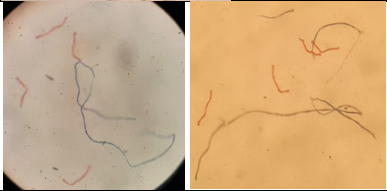
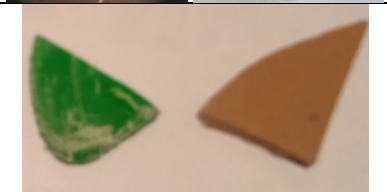
Таблиця 1

Основні ідентифіковані (представницькі) компоненти пластикового сміття
(та продуктів полімерізації природних компонентів), відібрані шляхом фільтрації зворотних потоків води
в напрямку суходіл – море, спричинених хвильовою активністю в межах пляжевої зони м. Южне розміром понад 0,5 см

Об'єкт	Типовий вигляд	Вид пластику	Щільність, г/см ³ (за характеристиками)	Умовний відсоток
Щільні обгортки від цукерок, їх фрагменти		Поліпропілен (PP) синтетичний полімер, продукт полімерізації пропілену	0,9–0,93 г/см ³	значна кількість
Одноразові трубочки для напоїв		Поліпропілен синтетичний полімер, продукт полімерізації пропілену	0,9–0,93 г/см ³	значна кількість
Цигаркові фільтри		Ацетатне волокно – оцтовий ефір целюлози (ацетилцелюлоза), продукт полімерізації природних компонентів		суттєва кількість
Пластиковий посуд. Фото: фрагменти стаканів		Поліпропілен синтетичний полімер, продукт полімерізації пропілену	0,9–0,93 г/см ³	суттєва кількість
Фрагменти риболовних знарядь, зокрема сітки		синтетичні поліамідні матеріали (нейлон, капрон)	1,01–1,24 г/см ³	незначна кількість
Пластикові кришки від пляшок та їх фрагменти, втулки, ущільнювачі під металеві кришки		Поліетилен високої щільності, низького тиску (HDPE), полімер аліфатичного органічного вуглеводня олефінового ряду етилену	0,93–0,97 г/см ³	незначна кількість
Фрагменти чи складові пластикових іграшок, зокрема "лего"		АБС-пластик (Акрилонітрил-бутадієнстирол), удароміцна технічна термопластична смола на основі кополімеру акрилонітрилу з бутадієном і стиролом	1,080 г/см ³	окремі екземпляри
Фрагменти гуми та гумові стрічки		Натуральний чи синтетичний каучук	Для ідентифікованих фрагментів – 1,2–1,28 г/см ³	окремі екземпляри
Фрагменти одягу. Фото: атласна стрічка з синтетичного волокна		Поліестери – полімери, одержувані поліконденсацією багатоосновних кислот з багатоатомними спиртами	1,38 г/см ³	окремі екземпляри

Таблиця 2

Основні ідентифіковані (представницькі) компоненти пластикового сміття, відібрані шляхом фільтрації зворотних потоків води в напрямку суходіл – море, спричинених хвильовою активністю в межах пляжевої зони м. Южне розміром менш як 0,5 см

Об'єкт	Типовий вигляд	Вид пластику	Щільність, г/см ³	Приблизний відсоток
Дрібні фрагменти огорток, пакетів		Поліпропілен PP, Поліетилен низької щільності (LDPE)	0,9–0,93 г/см ³ 0,91–0,96 г/см ³	значна кількість
Синтетичні волокна кольорові різної довжини та розміру		Поліамід, поліестр, поліпропілен	0,95–1,38 г/см ³	значна кількість
Зерна пінопласту		У пробах фіксувався безпресовий поліпропілен	1,069–1,125 г/см ³ (для поліпропілену не спіненого)	значна кількість
Фрагменти чи складові пластикових виробів невизначеної належності		В більшості – щільний пластик непрозорий, різних кольорів, гострокутні уламки, за складом – поліпропілен, поліетилен	0,9–0,96 г/см ³ ; понад 1 г/см ³	суттєва кількість
Фрагменти цигаркових фільтрів		Ацетатне волокно – оцтовий ефір целюлози (ацетилцелюлоза)		достатня кількість
Поролон		Пінополіуретан синтетичний пористий матеріал на основі поліуретану, в пробах фіксувався еластичний поролон	1,18 г/см ³	незначна кількість
Уламки одноразового посуду		Полістірол	1,07 г/см ³	незначна кількість
Фрагмент риболовних знарядь та інше – виті мотузки, синтетичні нити		Синтетичні поліамідні матеріали (нейлон, капрон)	1,15 г/см ³	незначна кількість
Утворення невідомого складу та генезису, візуально сприймаються як антропогенна складова		Інтенсивність фотолюмінесценції в ході лабораторних вимірювань не дала змогу ідентифікувати як фрагменти пластику	Об'єкти утримуються на плаву в концентрованому розчині хлористого цинку (0,18 г/см ³)	значна кількість

Дискусія і висновки

По-перше, слід зазначити, що застосований нами метод фільтрації мікропластику з поверхневих водотоків, незважаючи на результативність, не є методично обґрунтованим способом пробовідбору, і це поки що унеможливує кількісну оцінку вмісту синтетичних полімерів у межах пляжних зон. З іншої боку, можливість концентрування фактичного матеріалу в процесі пасивного пробовідбору за допомогою пасток із фільтрувального полотна, які доцільно встановлювати на шляхах зворотних хвильових водотоків, дає змогу більш детально та повно вивчати розподіл на узбережжях найбільш мобільної складової пластикового сміття та мікропластику. У майбутньому такий методичний підхід може сприяти створенню та дослідній експлуатації масштабних стаціонарних пасток із значним терміном експозиції, принципом роботи яких буде оснований на сепарації морського сміття у хвильовій зоні узбереж (пляжів) під час штормів за рахунок руху водних потоків у прямому і зворотному напрямках (Ємельянов та ін., 2023).

Наші дослідження засвідчили, що основна частина пластику має високу міграційну здатність у межах прибіжних ділянок, що визначається переносом потоками площинного стоку в періоди хвильової активності та відсутністю сталої компоненти в товщі піску в межах пляжу. Водночас також відбувається активне перенесення зворотними хвильовими потоками мінеральної природної компоненти піщаної та алеврито-пелітової розмірності, а також фрагментів пластиків, щільність яких вища за одиницю.

Іншою визначеною особливістю є факт перерозподілу мікропластику в межах пляжної зони, це фіксується переважно в пробах поверхневого шару піску, що відбиравались стандартним методом. У піщаних відкладах з точок 1 та 3 (рис. 1) східної та західної крайових частин пляжу кількість одиниць мікропластику значно менша, ніж у центральній частині. Це може свідчити як на користь припущення, що переважна кількість залишків полімерних виробів на пляжі пов'язана з місцевими джерелами надходження, так і вказувати на різні природні геоморфологічні умови – активну літодинаміку наносів вузьких пляжів у межах берегових уступів, що розмиваються. На користь останньої версії свідчить і факт відсутності обкатаності чи відшліфованості гострих кутів відібраних зразків пластиків, що, вірогідно, є ознакою нетривалого перебування уламків у межах гідродинамічно активних зон морського узбережжя.

Показовим фактом є те, що для різних категорій розмірності пластикових фрагментів достатньо кардинально змінюється їх видовий склад. Полімерні синтетичні об'єкти розміром понад 1 см представлені переважно поліпропіленом, полістиролом та виробами з поліетилену високої щільності, більшість з яких стосуються харчової промисловості, а в економічному сенсі – сфери послуг (одноразовий посуд, різноманітна харчова упаковка, тара для напоїв, ін.). У категорії більш дрібної розмірності пластикових фрагментів розширюється як видовий спектр полімерів, так і їх належність до різних економічних сегментів використання, водночас, вірогідно, продовжує домінувати побутова складова та сфера розваг.

Синтетичні волокна, що становлять більшість об'єктів найдрібнішої гранулометричної фракції – менш як 0,1 мм, присутні повсюдно і в значному кількісному складі, розрізняючись візуально за такими параметрами, як колір і довжина.

Отже, співвідношення категорій розмірностей відібраних компонентів пластиків та мікропластиків за загальним вмістом у пробах засвідчило низку особливостей різних тематичних груп синтетичних полімерів. Домінуючою категорією є пластиковий одноразовий посуд та аксесуари для харчування, які, вірогідно, слід вважати елементом впливу місцевого характеру та похідною сфери послуг. Проте, якщо в абсолютному обсязі і масі об'єктів безумовно домінують синтетичні полімери розмірністю понад 0,5 мм, то в кількісному відношенні найширше представлена категорія мікропластику. Також виникає логічне питання щодо кардинальної зміни видів пластиків (за хімічним складом, економічним призначенням тощо) для різних категорій їх розмірності – де акумулюються мікропластики – продукти розкладу пластикового сміття, представленого у складі пляжних наносів, і з яких джерел та об'єктів, відсутніх у складі цих компонентів у межах ділянки досліджень, надходить зафіксована дрібнодисперсна компонента.

Також у рамках проведених досліджень неможливо визначити, за наявним фактичним матеріалом та отриманими результатами, вагу та розподіл факторів впливу на засмічення пластиковими виробами та мікропластиком пляжевої зони. На це міг би дати відповідь моніторинг ділянки протягом року, зокрема в різні сезони, коли змінюється антропогенне навантаження місцевого характеру чи збільшується хвильова активність моря.

Внесок авторів: Володимир Ємельянов – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування); Євген Наседкін – концептуалізація, методологія, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Олена Іванік – концептуалізація, методологія, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Тамара Куковська – написання (перегляд і редагування); Володимир Юхимчук – програмне забезпечення, формальний аналіз, написання (перегляд і редагування); Олександра Митрофанова – формальний аналіз, написання (перегляд і редагування).

Подяки, джерела фінансування. Проведення досліджень за відповідною науковою тематикою стало можливим завдяки підтримці Європейським проектом за програмою Horizon 2020 DOORS (Developing Optimal and Open Research Support), грантовий договір 101000518.

Список використаних джерел

- Ємельянов, В. О., Наседкін, Є. І., Куковська, Т. С., & Митрофанова, О. А. (2021). Щодо розподілу пластикового сміття в межах хвильеприбіжної зони пляжу міста Южне. *Геологія і корисні копалини Світового океану*, 17(3), 34–41. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.03.034>
- Ємельянов, В. О., Наседкін, Є. І., Куковська, Т. С., Шураєв, І. М., & Митрофанова, О. А. (2023). Проектування обладнання для спостереження розподілу пластикового сміття у хвильеприбіжних зонах. *Геологія і корисні копалини Світового океану*, 19(1), 69–78. <https://doi.org/10.15407/gpimo2023.01.069>
- Український, В., Золотарьов, Г., Балакін, В., & Золотарьов, М. (2018). Базова оцінка та визначення Доброго екологічного стану (ДЕС) морського середовища Чорного моря в межах виключної морської економічної зони України. Оцінка процесів сучасної реседиментації на шельфі Чорного моря. Т. 2. *Звіт про НДР*. https://sea.gov.ua/img/reports/2018_old/Theme_1_part2.pdf
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. (2009). Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS-OR&R-30. https://www.researchgate.net/publication/285484205_Proceedings_of_the_International_Research_Workshop_on_the_Occurrence_Effects_and_Fate_of_Microplastic_Marine_Debris
- Aytan, Ü., Pogojeva, M., & Simeonova, A. (2020). Marine Litter in the Black Sea. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) Publication No: 56. Istanbul.
- Collignon, A., Hecq, J.-H., Galgani, F., Collard, F., & Goffart, A. (2014). Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean–Corsica). *Marine Pollution Bulletin*, 79(1–2), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.023>

Constant, M., Ludwig, W., Kerhervé, Ph., Sola, J., Charrière, B., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., & Heussner, S.S. (2020). Microplastic fluxes in a large and a small Mediterranean river catchments: The Têt and the Rhône. *Northwestern Mediterranean Sea, Science of The Total Environment*, 716, 136984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136984>

Falahudin, D., Cordova, M.R., Sun, X., Yogaswara, D., Wulandari, I., Hindarti, D., & Arifin, Z. (2020). The first occurrence, spatial distribution and characteristics of microplastic particles in sediments from Banten Bay, Indonesia. *Science of The Total Environment*, 705, 135304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135304>

Kershaw, P. J., Turra, A., & Galgani, F. (2019). Guidelines or the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. *Rep. Stud. GESAMP*, 99.

Imhof, H., Schmid, J., Niessner, R., Ivleva, N., & Laforsch, C. (2012). A novel highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments. *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 10, 524–537. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.524>

Löder, M. G. J., & Gerdts, G. (2015). Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics – A Critical Appraisal. In: M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8

Săvucă, A., Strungaru, Ș. A., Nicoară, M., & Plăvan, G. (2017). A study regarding the pollution of sediments from Romanian Black Sea Coast with microplastic fibers. *Analele Științifice ale Universității "Alexandru Ioan Cuza" din Iași, s. Biology Animations*, 63, 85–90.

Şener, M., Doğruyol, P., & Balkaya, N. (2019). Microplastic pollution in the Black Sea Coast of the Anatolian side of Istanbul Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 172, 351–358. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.25111>, https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_172_papers/172_2019_351.pdf

References

Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>

Arthur, C., Baker, J., & Bamford, H. (2009). Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects and Fate of Microplastic Marine Debris. National Oceanic and Atmospheric Administration Technical Memorandum NOS-OR&R-30. https://www.researchgate.net/publication/285484205_Proceedings_of_the_International_Research_Workshop_on_the_Occurrence_Effects_and_Fate_of_Microplastic_Marine_Debris

Aytan, Ü., Pogojeva, M., & Simeonova, A. (2020). Marine Litter in the Black Sea. Turkish Marine Research Foundation (TUDAV) Publication No: 56. Istanbul.

Collignon, A., Hecq, J.-H., Galgani, F., Collard, F., & Goffart, A. (2014). Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean–Corsica). *Marine Pollution Bulletin*, 79(1–2), 293–298. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.11.023>

Constant, M., Ludwig, W., Kerhervé, Ph., Sola, J., Charrière, B., Sanchez-Vidal, A., Canals, M., & Heussner, S. S. (2020). Microplastic fluxes in a large and a small Mediterranean river catchments: The Têt and the Rhône. *Northwestern Mediterranean Sea, Science of The Total Environment*, 716, 136984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136984>

Falahudin, D., Cordova, M.R., Sun, X., Yogaswara, D., Wulandari, I., Hindarti, D., & Arifin, Z. (2020). The first occurrence, spatial distribution and characteristics of microplastic particles in sediments from Banten Bay, Indonesia. *Science of The Total Environment*, 705, 135304. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135304>

Iemelyanov, V. O., Nasedkin, E. I., Kukovska, T. S., Mitrofanova, O. A. (2021). Regarding the distribution of plastic waste within the surf zone of the beach of the city of Yuzhne. *Geology and Minerals of the World Ocean*, 17(3), 34–41 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/gpimo2021.03.034>

Iemelyanov, V. O., Nasedkin, E. I., Kukovska, T. S., Shuraev, I. M., Mitrofanova, O. A. (2023). Designing equipment for monitoring the distribution of plastic waste in surf zones. *Geology and Minerals of the World Ocean*, 19(1), 69–78 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/gpimo2023.01.069>

Imhof, H., Schmid, J., Niessner, R., Ivleva, N., & Laforsch, C. (2012). A novel highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments. *Limnol. Oceanogr.: Methods*, 10, 524–537. <https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.524>

Kershaw, P. J., Turra, A., & Galgani, F. (2019). Guidelines or the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean. *Rep. Stud. GESAMP*, 99.

Löder, M. G. J., & Gerdts, G. (2015). Methodology Used for the Detection and Identification of Microplastics – A Critical Appraisal. In: M. Bergmann, L. Gutow, M. Klages (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_8

Săvucă, A., Strungaru, Ș. A., Nicoară, M., & Plăvan, G. (2017). A study regarding the pollution of sediments from Romanian Black Sea Coast with microplastic fibers. *Analele Științifice ale Universității "Alexandru Ioan Cuza" din Iași, s. Biology Animations*, 63, 85–90.

Şener, M., Doğruyol, P., & Balkaya, N. (2019). Microplastic pollution in the Black Sea Coast of the Anatolian side of Istanbul Turkey. *Desalination and Water Treatment*, 172, 351–358. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.25111>, https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_172_papers/172_2019_351.pdf

Ukrainskiy, V., Zolotaryov, G., Balakin, V., & Zolotaryov M. (2018). Basic assessment and determination of the Good Ecological Status (GES) of the marine environment of the Black Sea within the exclusive maritime economic zone of Ukraine. Assessment of modern resedimentation processes on the Black Sea shelf. Vol. 2. *Report on the NDR* [in Ukrainian]. https://sea.gov.ua/img/reports/2018_old/Theme_1_part2.pdf

Отримано редакцією журналу / Received: 13.09.23
Прорецензовано / Revised: 09.12.23
Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Volodymyr YEMELIANOV¹, DSc (Geol. & Mineral.),
Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-8972-0754
e-mail: eva@nas.gov.ua

Yevgen NASIEDKIN², PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-2633-9291
e-mail: nasedevg@ukr.net

Olena IVANIK³, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8782-4883
e-mail: om.ivanik@gmail.com,

Tamara KUKOVSKA⁴, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-7532-8885
e-mail: t.kukovska@gmail.com

Volodymyr YUKHYMCHUK⁴, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5218-9154
e-mail: v.yukhymchuk@gmail.com

Oleksandra MYTROPANOVA¹, PhD Student
ORCID ID: 0000-0001-5971-9122
e-mail: mitrof_ol@ukr.net

¹Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

⁴V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

DISTRIBUTION OF MACRO- AND MICRO-PLASTICS WITHIN THE BEACH ZONES OF INTERCONTINENTAL SEAS (CASE STUDY FOR YUZHNE CITY, UKRAINE)

Background. Suburban beaches within the Ukrainian coast of the northwestern shelf of the Black Sea, taking into account the density of industrial and social infrastructure, the proximity to the confluence of large rivers with significant catchment areas into the sea, are indicative of objects for carrying out regulatory studies of the distribution of plastic waste and microplastics in the components of the environment.

Methods. The regularities of the distribution of plastic waste and microplastics within the coastal zone of the north-western part of the Black Sea were determined using the example of test sites in the city of Yuzhne (Odesa region, Ukraine). To analyze the quantitative and qualitative

characteristics of the synthetic material and to determine the features of its formation, distribution and accumulation in the coastal zone, the method of filtering water flows of the surface runoff was used. Visual analysis of plastic polymers was performed and their types were determined using spectroscopy and OPUS 7.5 software.

Results. The results of Raman spectroscopy studies proved that the majority of selected samples of macro- and microplastics are represented by polypropylene, polyethylene and polystyrene. It has been confirmed that the main part of the plastic has a high migration capacity within the coastal areas, which is determined by the transport of runoff during periods of wave activity and the absence of a permanent component in the sand layer within the beach. It was determined that for different dimensional categories of plastic fragments, their species composition changes radically. Polymeric synthetic objects larger than 1 cm are represented mainly by polypropylene, polystyrene, and high-density polyethylene products. In the category of finer dimensions of plastic fragments, both the species spectrum of polymers and their belonging to different economic segments of use is expanding. Synthetic fibers, which make up the majority of objects of the smallest particle size fraction - less than 0.1 mm - are present everywhere and in significant quantitative composition.

Conclusions. Research shows that the parameters of the coastline (width, length, slope, shape, presence of vegetation, anthropogenic variability), hydrogen processes and the geological structure of the coastal zone have a significant impact on the formation of the conditions for the accumulation of plastics and microplastics. In order to further study the factors influencing the pollution of the beach area by plastic products and microplastics, monitoring studies are needed within the presented test areas.

Keywords: pollution, plastic waste, microplastic, Black Sea, coastal zone, lithodynamics.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 528.8+631.4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.12>

Petro TROFYMENKO¹, DSc (Agric.), Accos. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7692-5785
e-mail: trofimenkopetr@ukr.net

Oliha TOMCHENKO², PhD (Engin.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6975-9099
e-mail: tomch@i.ua

Rostyslav PORALO¹, Student
e-mail: poralo1995@gmail.com

Vitalii ZATSERKOVNYI¹, DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Iryna STAKHIV¹, PhD (Geol.), Assist.
ORCID ID: 0009-0007-3090-6988
e-mail: stakhivira@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine

²State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

REMOTE IDENTIFICATION OF MICROSEDIMENTAL RELIEF FORMS AND SOIL SECTIONS OF AGROLANDSCAPES OF THE FORESTS OF UKRAINE WITH SIGNS OF HYDROMORPHISM

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Background. Agricultural lands play a key role in ensuring the food security of the population and the development of the country's economy. However, excessive wetting poses a significant threat to these lands, as a result of which the conditions for the formation of soils with signs of glaciation and low fertility are formed within the lower relief elements, which significantly reduces their potential. In order to highlight the problems of geospatial identification of micro-recessed landforms (MRLF) on agricultural lands, the article uses spectral indices based on the data of RSE.

Methods. 6 spectral indices were selected for the research. They were used to obtain data on areas of soil subsidence on arable lands, namely: NDWI, NWI, NDMI, NDVI, OSAVI, WRI. Solving research tasks involved the use of data from the Sentinel-2A satellite system. In order to visualize the spread of MRLF on the research territory, a high-resolution image (0.2 m per 1 pixel) obtained in the "Digitals Professional 5.0" software was used. Processing and geospatial visualization of the RSE data were performed in the Arc Map environment of the Arc GIS 10.8 program using the raster calculator tool.

Results. Within the reference fields, the dynamics of the values of water and vegetation indices were constructed and analyzed, and the identification ability for the geospatial separation of soil areas with signs of hydromorphism was evaluated. It is shown that the identification capacity of the indices depends not only on the level of soil moisture, but also on the biomass of vegetation (scales of crop damage), which is indicated by the high information capacity of the traditional vegetation index NDVI. The most informative index ranges were established: for NDVI, the range is from -0.117 to -0.024 with an identification percentage of 98.0 %; for OSAVI – 78.0 % with a range of 0.255–0.313; for NDMI with a range variation of -0.041 to -0.149 and an identification percentage of 56.0.

Conclusions. The results of remote identification of the areas of the MRLF enabled to obtain information about the moisture content of the soils of the arable lands of the research area. The ability of the specified indices during the geospatial identification of micro-recessed landforms (MRLF) and soil areas within them with signs of hydromorphism was evaluated.

It is demonstrated that the use of orthophotos with a resolution of 0.2 m per 1 pixel serves as important supporting aids of successful completion of the specified tasks. It was found that the identification ability of water indices on test fields without existing vegetation is too low. On the other hand, the shielding of the soil surface by vegetation with areas of damaged crops makes it possible to isolate MRLF.

The obtained information can be used during the development of the methodology of soil science surveying and planning of large-scale soil survey activities.

Keywords: micro-recessed landforms (MRLF), subsidence, remote sensing of the Earth (RSE), spectral indices of vegetation and moisture.

Background

The study of the condition of the soils of agro-landscapes is one of the urgent problems related to important aspects of the modern functioning of any state. Agricultural lands play a key role in ensuring the food security of the population and the development of the country's economy. However, excessive moisture poses a great threat to these lands, as a result of which the conditions for the formation of soils with signs of glaciation and low fertility are formed within the lower relief elements, which significantly reduces their potential. To solve the problems of geospatial identification of defined areas of soil cover and areas of lowered relief elements on agricultural lands, methods of remote sensing of the Earth (RSE) are increasingly being used. The use of RSE tools makes it possible to obtain up-to-date and accurate information about the condition of individual plots of land, monitor, control and forecast the impact of various factors on their condition. The study of this issue is of great

importance for preserving soil fertility, ensuring the sustainability of ecosystems and their stability. In addition, the development of algorithms for the automated identification of areas and areas of soil cover that are in a state of periodic and long-term waterlogging is important, because they provide for the possibility of isolating soil areas with signs of siltation and siltiness.

Micro-recessed landforms (MRLF) are known to be small hollows and depressions on the surface of the soil that arise under the influence of various processes (for example, erosion, landslides, waterlogging, and others). They can have a diameter from several tens of centimeters to several meters, a depth of several tens of centimeters and a shape of various complexity (Romanchuk, 2018). MRLF, as a rule, has a mostly negative impact on agriculture. However, in some cases, they can provide soils, especially the ones of light granulometric composition, with the characteristics of siltiness, which slows down unproductive infiltration along

the profile and moisture loss and can be useful in dry regions or in conditions of reduced rainfall. At the same time, it should be borne in mind that the forms of relief mentioned above can be the cause of flooding of low-lying areas of the ground cover, which reduces the yield of cultivated plants or leads to their death.

As it was mentioned before, one of the key topics of research in the field of soil quality and condition research is the detection of subsidence or micro depressions that are formed in the fields. To study and monitor subsidence, scientists use data obtained from satellites, aircraft and other means of remote sensing. These data allow getting detailed information about changes in relief, soil moisture and plant parameters in the field. It is worth noting that the study of the formation of relief conditions at different levels of soil moisture can be carried out using two main approaches. The first one is based on the remote diagnosis of soil free from vegetation, when the value of the NDVI index does not exceed 0.1. The second one involves the use of RSE tools on areas of the ground cover covered with plants (shielded soil). The condition of the plant cover indirectly indicates the level of favorable conditions for their functioning under the influence of many factors, in particular, the availability of soil moisture (lack of moisture or its excessive amount) (I) and the level of their fertility (II), which largely depends on the presence of siltiness signs. The latter, as it is known, significantly reduces soil productivity due to the presence of toxic compounds in them.

Field research of MRLF is interdisciplinary in nature and it involves the work of scientists from various fields, such as geology, soil science, agronomy, hydrology, and others. It is aimed at understanding the causes of subsidence, determining their scale and developing effective strategies for managing soil and land resources. In particular, the problems of classification of MRLF that developed on agricultural lands of the reclamation system "Kuchynivka", located in the Shchor district of the Chernihiv region, were studied. In the work (Romanchuk, 2018) based on Sentinel-2 images and the NWI water index, soil moisture and MRLF were studied, as a result of which a map of soil surface layer moisture was constructed and the high efficiency of using the selected index for evaluating evapotranspiration was established. The use of the method of soil moisture research based on space images is described in the article of S.O. Dovhyi (Dovhyi et al., 2020). In the work (Slobodanyk, 2016), the methods of forecasting the yield of agricultural crops using remote vegetation indices PVI, SAVI, TSAVI, ARVI, GNDVI, NDVI were investigated, which made enabled to identify the problem areas of suppressed vegetation. In this case, it should be understood that crop yield data may indirectly indicate unfavorable moisture conditions that have arisen within the boundaries of the MRLF plots.

The causes of subsidence of the soil cover in the Central Valley, California were explored in the work (Stanko et al., 2019), where with the help of a model of the hydrological regime of the Central Valley created in GIS, the patterns of subsidence and their consequences were revealed in detail. The research investigated the features of using multispectral remote sensing from aboard an unmanned aerial vehicle (UAV) for mapping the state of water stress in corn in a farm which included the analysis of changes in the basic values of water stress and the corresponding values that are not associated with transpiration. The results demonstrated a high correlation between some vegetation indices and the water stress index. The specified demarcation made it possible to more clearly identify the regularities of the

influence of various factors on the formation of water stress in plants, including the conditions of the MRLF.

Therefore, it should be stated that the study of formation, development of MRLF and territorial distribution of soils with signs of glaciation is an important scientific problem. Conducting an assessment of the structure of the soil cover should include remote identification of the above-mentioned areas, as well as provide for the development of algorithms for determining the danger of deterioration of their condition.

The article is devoted to the study of the features of the use of specialized indices of the state of vegetation and soil moisture obtained from the data of the RSE for the identification of MRLF with areas of soil cover that have signs of glaciation and calculation of their areas. The work solves the problem of developing an algorithm for the remote identification of defined problem areas of the soil cover based on the established ranges of water index values, characteristic of such areas. The geospatial separation of areas of the MRLF with areas of soil cover that have signs of glaciation involves a combination of spectrozonal images of the earth's surface and ultra-high resolution orthophotos.

The purpose of this study is to analyze areas of subsidence of agricultural land using remote sensing technologies, to substantiate the feasibility of their use to assess the condition of soils with signs of hydromorphism and to ensure the rational use of soil and land resources.

To achieve this goal, an analysis of literary sources is provided, data from field studies is collected and processed, and data from the RSE are used to obtain accurate maps of subsidence areas. The results of the research can become the basis for the development of effective methods of automated inventory of MRLF with soils with signs of siltiness located within them.

MRLF pose a problem for the use of agricultural land, because they concentrate excess moisture, which inhibits the formation of biomass of most plants. In addition, soils with gley genetic horizons are characterized by obstruction of vertical movement and horizontal redistribution of excess moisture, which creates anaerobic conditions for further gley formation. At the same time, oxides of iron and aluminum, which are toxic, are formed in the soil. Such soils have a low level of fertility, low productivity and quality of the crop. According to (Sherstyuk et al., 2021), an increase in production costs leads to a decrease in its profitability, environmental pollution and other related problems. In addition, MRLF can increase the risks of water erosion of soils and deflation, which in turn leads to physical losses of the soil, and as a result, to the development of practically non-renewable processes. That is why it is important to study MRLF in the fields of the research area. Boryspil district is located in the Kyiv region and is of great importance for the agriculture of Ukraine (fig. 1).

Characteristic elements of the relief in the research area are old rivers, lake depressions and dune formations (Martyn, Osypchuk, & Chumachenko, 2015). The background soils are: sod-podzolic soils on ancient alluvial and water-glacial deposits, moraine and loess rocks; podzolized soils mainly on loess-like rocks; meadow and chernozem-meadow soils on alluvial deposits; sod clay soils mainly on loess-like rocks. The research area is characterized by a high concentration of agricultural enterprises that specialize in the cultivation of plant products. Therefore, the efficiency of the use of agricultural land is an important component of achieving the maximum yield and ensuring the food security of the state. Micro-sags (subsidence) of soils in the research territory, which belongs to the Polissia zone of Ukraine, is one of the characteristic

qualitative features of the soil cover of agricultural lands. Their presence negatively affects the growth and development of plants, reduces the yield of crops and the quality of products.

Therefore, when assessing the suitability of the soil cover for production tasks, it is advisable to take into account not only

the presence of MRLF, but also the specifics of the impact on the soil in the short-term and long-term perspectives.

Micro-swelling (subsidence) of soils in the research area on the soil cover is differentiated by the nature of the manifestation of the negative impact of excessive moisture (fig. 2).

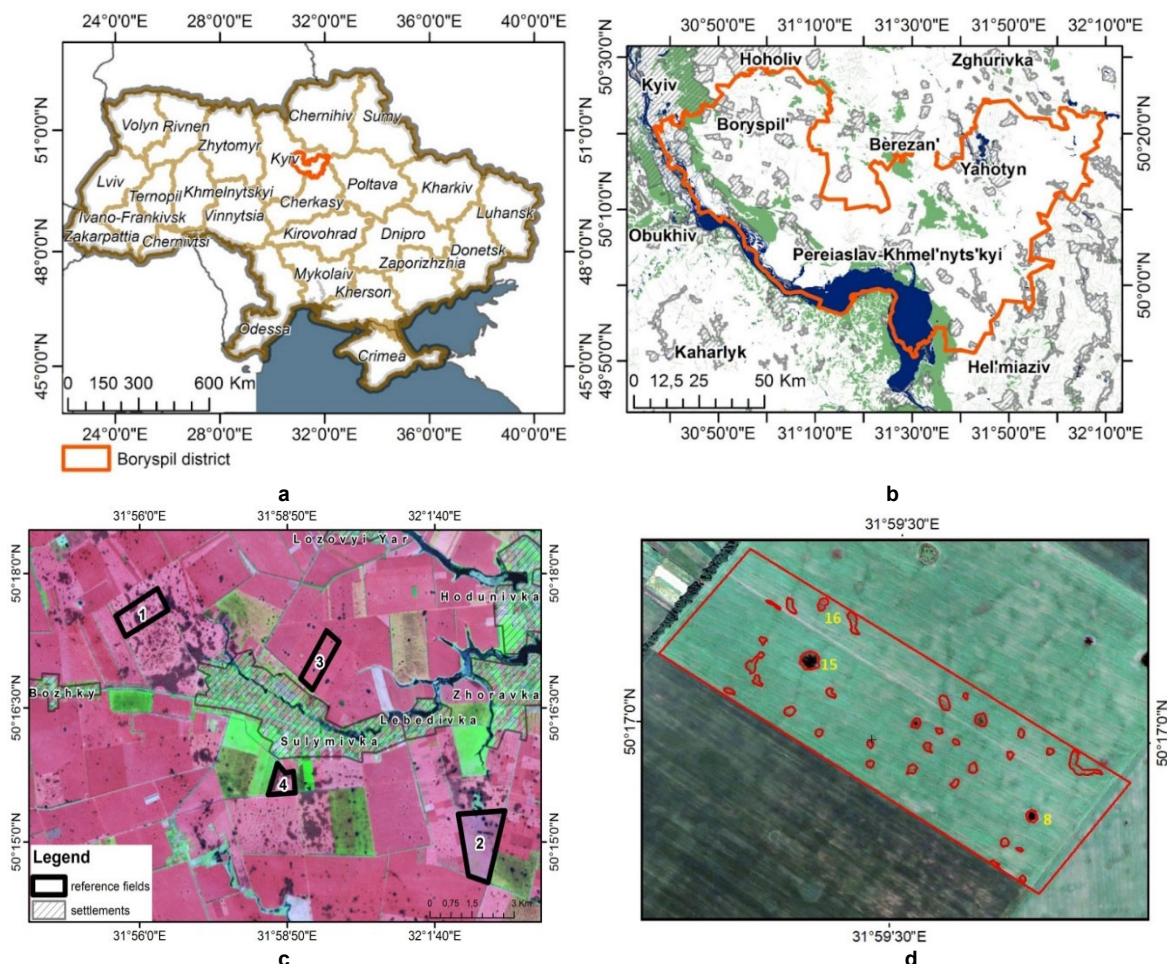


Fig. 1. General view of the research area and test fields:

a – a map of Ukraine with Boryspil district highlighted in red; b – Boryspil district in approximation;
c – test fields on the territory of the Sulymiv Territorial Community superimposed on the Sentinel-2 space image for April 18, 2018;
d – test field No. 3 with selected areas of MRLF (8, 15, 16) used for the identification ability of spectral indices superimposed on ultra-high resolution space images



Fig. 2. Micro-recessed landforms and their impact on soils and crops.

Ultra-high resolution composite images (0.2 m by 1 pixel) were obtained in Digital Professional 5.0 software:

a, b – TRF No. 1 (arable land is overgrown with shrubs and young forest);
c – TRF No. 3 (figure shows the damaged areas of winter wheat sowing)

Their development leads to the transformation of arable land into forest plantations (see fig. 2a, b, c), cause irreversible changes in the soil, which reduces the yield of

crops and the quality of products (see fig. 2a, b, c). The rest of the settlements, which are fixed remotely, belong to the elements of the nanorelief and are less harmful. However,

the research program did not provide for the isolation of their habitats, because the processes of waterlogging and glaciation of soils can also occur within them, which is undoubtedly a negative phenomenon that requires an assessment and determination of the extent of the danger.

Methods

A characteristic feature of the state of vegetation, as one of the objects of the earth's surface, is its spectral reflectance, which is differentiated by differences in the reflection of radiation of different wavelengths. As it is known, to work with spectral information, RSE often resort to the creation of so-called "index" images. "Spectral indices", as indicators of the characteristics of the reflection of solar radiation from various objects on the earth's surface in different spectral ranges, are determined on the basis of mathematical operations with the spectral brightnesses of the imaging system obtained in different channels of the RSE (Kuchma et al., 2019).

Earth remote sensing data from the Sentinel-2 satellite are publicly available at <https://dataspace.copernicus.eu/browser> and are part of the Copernicus program of the European Space Agency (ESA). In particular the use of Sentinel-2 data for soil research were studied.

Sentinel-2 satellite data with cloud cover <20 % were used to obtain maps of the territory's humidity and calculations of subsidence areas. Two scenes on the date: 04/18/2018 were selected for analysis. Calculations, execution of geoanalytical tasks and development of cartographic materials were performed in Arc GIS Arc Map 10x software.

In order to visualize the extent of the spread of MRLF on the research territory and their impact on the soil, a high-resolution image (0.2 m by 1 pixel) obtained in the "Digitals

Professional 5.0" software, which was developed by the state research and production enterprise "Geosystem", Ukraine, was used.

The online resource EO Browser (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>) was used to obtain graphs of changes in NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and NDWI (Normalized Difference Water Index) indices over the years. It should be noted that EO Browser combines many functions: data comparison, various automatic visualization parameters, channel synthesis, area measurement, obtaining statistical data in the form of graphs. Its application made it possible to obtain the dynamics of changes in the vegetation and water index and to export the received data in Microsoft Excel format for further analysis. The determined methodical approach made it possible to monitor and analyze the trends of changes in vegetation and water resources in the selected region during the research period.

During the calculation of the area of MRLF on agricultural land, all other classes of objects that are not agricultural land, but may be overmoistened, namely: urban agglomerations, hydrographic objects, forest massifs and other objects, are excluded. For this purpose, the classification map of surface types of Ukraine obtained from the ESA World Cover 2021 resource was used, which consists of 10 types of the earth's surface (Zanaga, Van De Kerchove, & Daems, 2021). One of which (cropland) was used to carve out an area of agricultural land. ESA World Cover is a map of land cover types with a spatial resolution of 10 meters created by the European Space Agency under the Copernicus Global Land Service (CGLS-LC) program. This map was built from annual Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images (fig. 3).

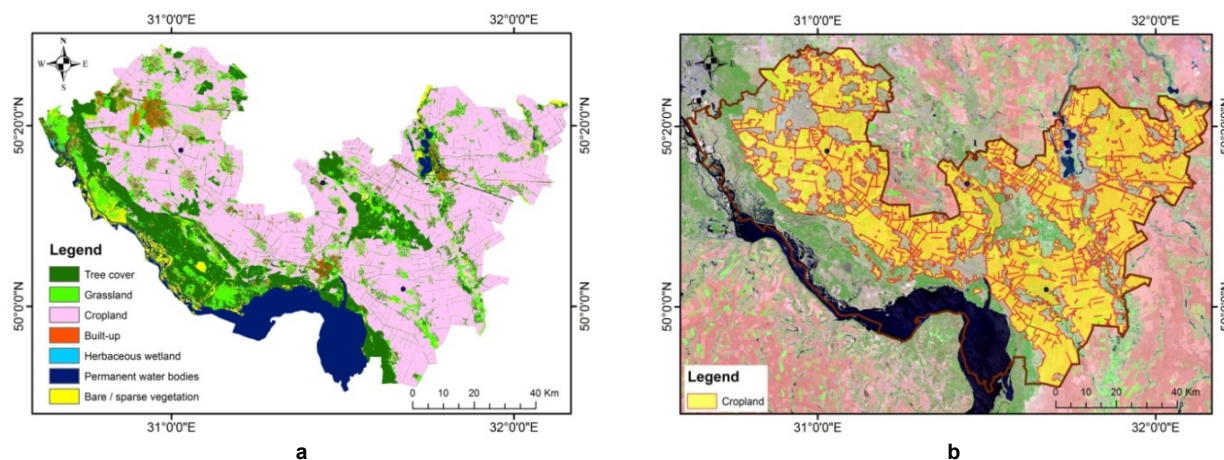


Fig. 3. The input data of land surface types were used to create a mask of agricultural land within Boryspil district:
a – classification map of land surface types ESA World Cover 2021; b – the field mask superimposed on the Sentinel-2 space image for April 18, 2018 with a combination of channels 12,8A,4

The locations of the test reference fields (TRF) of the studies are shown in Fig. 1. According to the analyzed data, the main crops in the research area are corn and wheat.

Results

On the basis of spectral indices, the moisture content was estimated both in the vegetation cover and in the upper layer of the open soil (fig. 4).

The values of NWI, NDWI, WRI, NDSI, NDMI, OSAVI were calculated for each pixel based on the respective dependencies. In the resulting images, wetter areas appear darker, and in this case correspond to lowered relief elements with increased humidity or partially filled with water.

Territorial selection of research plots for the selection of a "working" index, which best identifies areas of the MRLF, completed this stage of conducting research.

After visual verification of the obtained index images of soil moisture by the geospatial distribution of NDVI values (see fig. 4), the index that best reflects the differentiation of overmoistened arable land areas (MRLF) was chosen. This is NDWI. The moisture scale contains seven segments (Dovgiy et al., 2020), which reflect the levels of soil moisture.

The wettest areas, shown in blue, where increased soil moisture is periodically observed and waterlogging processes may continue, while within dry zones (shown in green) with elevated relief elements, on the contrary, a lack of moisture may be felt. As a result, a map of the moisture of the surface

layer of the soil was built, on which the vast majority of MRLF with increased humidity is clearly visualized (fig. 5).

According to the research results, it was found that the area of the MRLF in the territory of the research varies from 0.0034 to 0.9388 with an average value of 0.0637 m².

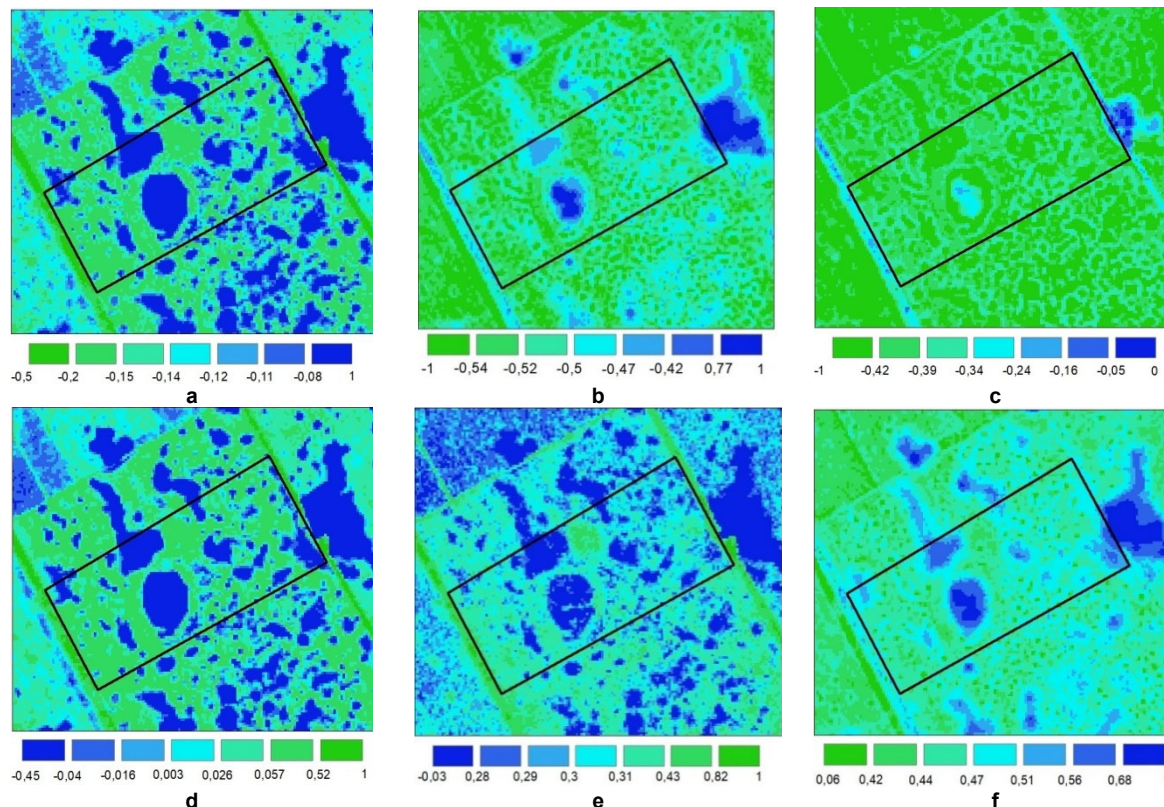


Fig. 4. Fragments of moisture maps of the territory on the example of the reference field No. 1 from the MRLF (contours are marked in black) obtained from remote spectral indices calculated on the basis of the Sentinel-2 image for April 18, 2018:
a – NDWI, b – NWI, c – NDMI, d – NDVI, e – OSAVI, f – WRI

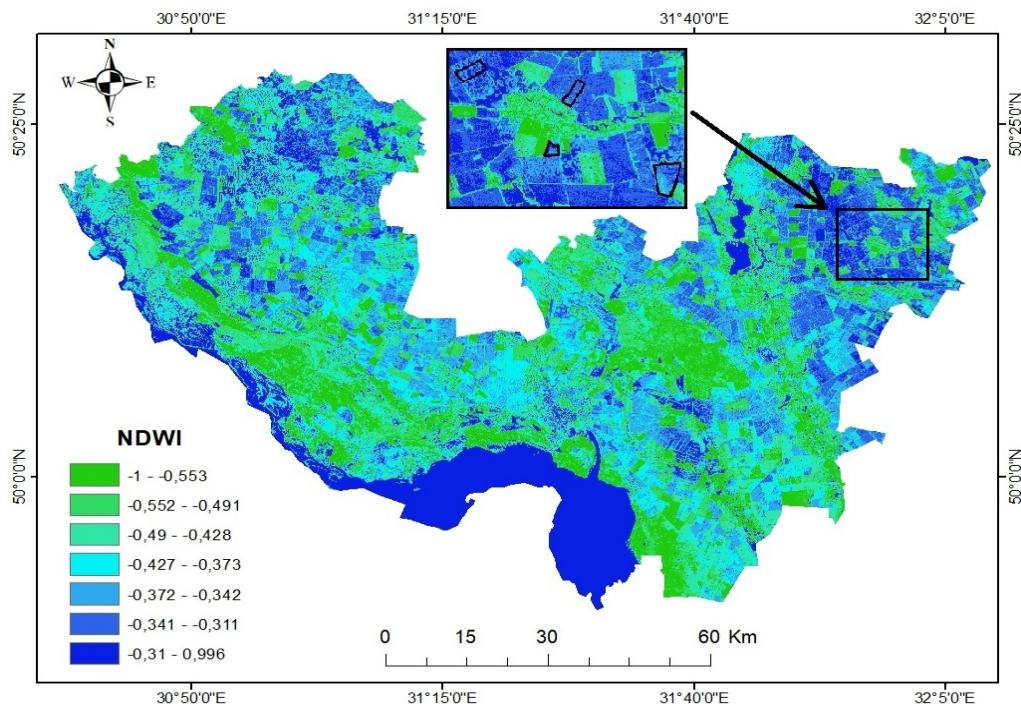


Fig. 5. The map of the distribution of moisture in the territory of Boryspil district was built according to the NDWI index for 04/18. 2018

The dynamics of index value changes and the state of the MRLF in the research area. Further, for a more visual display of changes in the moisture content of agricultural lands in the Boryspil district, graphs of changes in vegetation and water indices for 7 years were constructed for all TRFs from the MRLF (fig. 6–7).

NDVI measurement data from 2017 to 2023 on four reference fields varies from -1.0 to 1.0. From January 2018 until the end of April, all areas were excessively wet, which is a consequence of the melting of snow and ice in warm winter conditions. NDVI values indicate the absence of

vegetation on the 1st and 4th test fields (see fig. 7), while on the 2nd and 3rd fields there are winter wheat crops (index values 0.20–0.25). Therefore, the earth's surface on the 1st and 4th test fields is free from vegetation and weakly shielded by vegetation areas of the soil cover.

The graph shows the dynamics of the NDWI index at four TEPs with measurements (fig. 7). The values of the NDWI index correspond to the following ranges: 1.0–0.2 – "water surface", 0.2–0.0 – "wet areas", 0.0 – -0.3 – "dry surfaces", -0.3 – -1.0 – "arid areas".

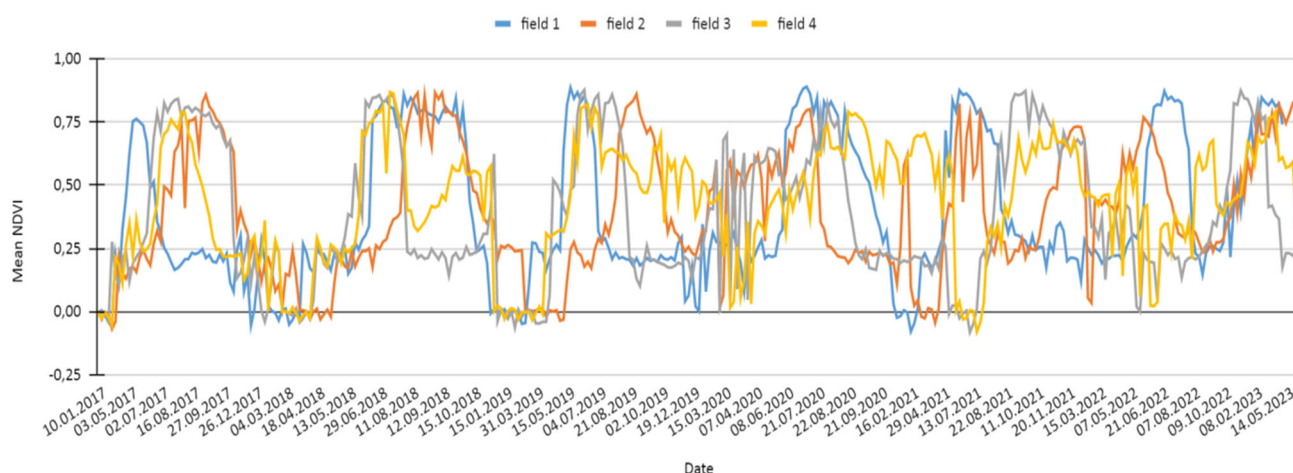


Fig. 6. The graph of changes in the vegetation index (NDVI) from 2017 to 2023 on reference fields

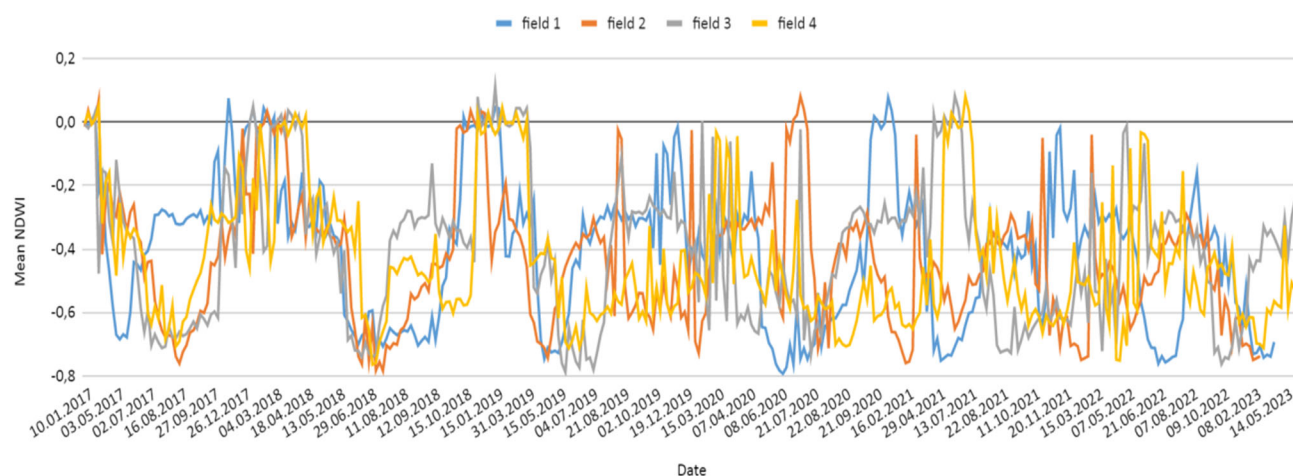


Fig. 7. The schedule of changes in the water index (NDWI) from 2017 to 2023, on reference fields

From the beginning of January 2017 to the end of February, the NDWI values at sites 2, 3 and 4 were in the range of 0.0–0.2, indicating high humidity, probably due to the presence of melting snow. From late 2017 to mid-April 2018, all sites except site 2 were overmoistened, while site 2 was only wet until late March. Since mid-October 2018, the NDWIs of the first and second sections have reached values of 0.0–0.2.

The high variation of the values of the indices on the test fields indicates significant differences in the level of soil moisture and the differentiation of the territory by the amount of biomass accumulation by vegetation at the time of removal.

The study of the identification ability of the indices was carried out by establishing the correspondence between the areas of the MRLF on the ground cover with soils with signs of silt, established on the basis of ultra-high resolution images and isolated areas that are formed by the geospatial

concentration of high values of the indices: NDVI – 1, 2, 3, NDWI – 5, 6th, 7th grades; NDMI – grades 5, 6, 7; OSAVI – 1, 2, 3 (see fig. 4).

A graphic display of the geospatial identification of areas of soils with signs of siltiness by various indices is shown in figure 8. Red shows the limits of visual localization of soil areas with the consequences of hydromorphism based on ultra-high resolution orthophotos.

The identification ability of indices was determined on the basis of an expert classification scale with percentage intervals: 0–33 – "low ability", 34–66 – "average", 67–80 – "increased", 81–100 – "high".

Table 1 presents the identification ability of vegetation indices in relation to the localization of MRLF. As can be seen from the table, the high identification ability of the indices was found on the 3rd test field, almost all the indices

showed a high percentage of detected MRLF. Satisfactory indicators were recorded on the 2nd test field. The lowest percentage was shown by 1 test field. In general, it should be stated that the identification capacity of vegetation indices depended on the level of soil moisture. Therefore, in the case of remote diagnosis of the MRLF, it is necessary to take into account the peculiarities of the moisture supply of the territory, which in practical terms indicates the need to choose a year with a sufficient amount of soil moisture in the period from March to August, which turned out to be the year 2018 (see fig. 8).

Fig. 9 presents the index ranges that proved to be the most informative.

Thus, for test field 3, plot 8, the most informative was the NDVI index with a range from -0.117 to -0.024, the percentage of identification is 98.0 %; for OSAVI – 78.0 % with a range of 0.255–0.313; for NDMI with a range variation of -0.041 – (-0.149) and an identification percentage of 56.0.

According to research results, the identification ability of indices depends not only on the level of soil moisture, but

also on the geospatial differentiation of vegetation biomass (scales of crop damage), as indicated by the values of the traditional vegetation index NDVI.

As predicted, the identification ability of the vegetation indices NDVI, NDWI, OSAVI, NDMI, among which all but the first one are considered classical water indices, on test fields without existing vegetation is too low. This is due to the fact that the very fact of increased soil moisture is not a direct consequence of their becoming oleaginous. Instead, the presence of vegetation on the earth's surface allows us to indirectly fix the localization of the so-called "potholes" with clear signs of damaged crops. In addition, as is known, the lack of vegetation shielding of the soil of arable land is observed only for about 6 weeks, which significantly narrows the possibilities of using RSE tools due to time constraints. That is why, for the geospatial separation of soil areas with signs of hydromorphism, it is advisable to use an approach characterized as remote phytoindication (indirect remote soil research through vegetative plants).

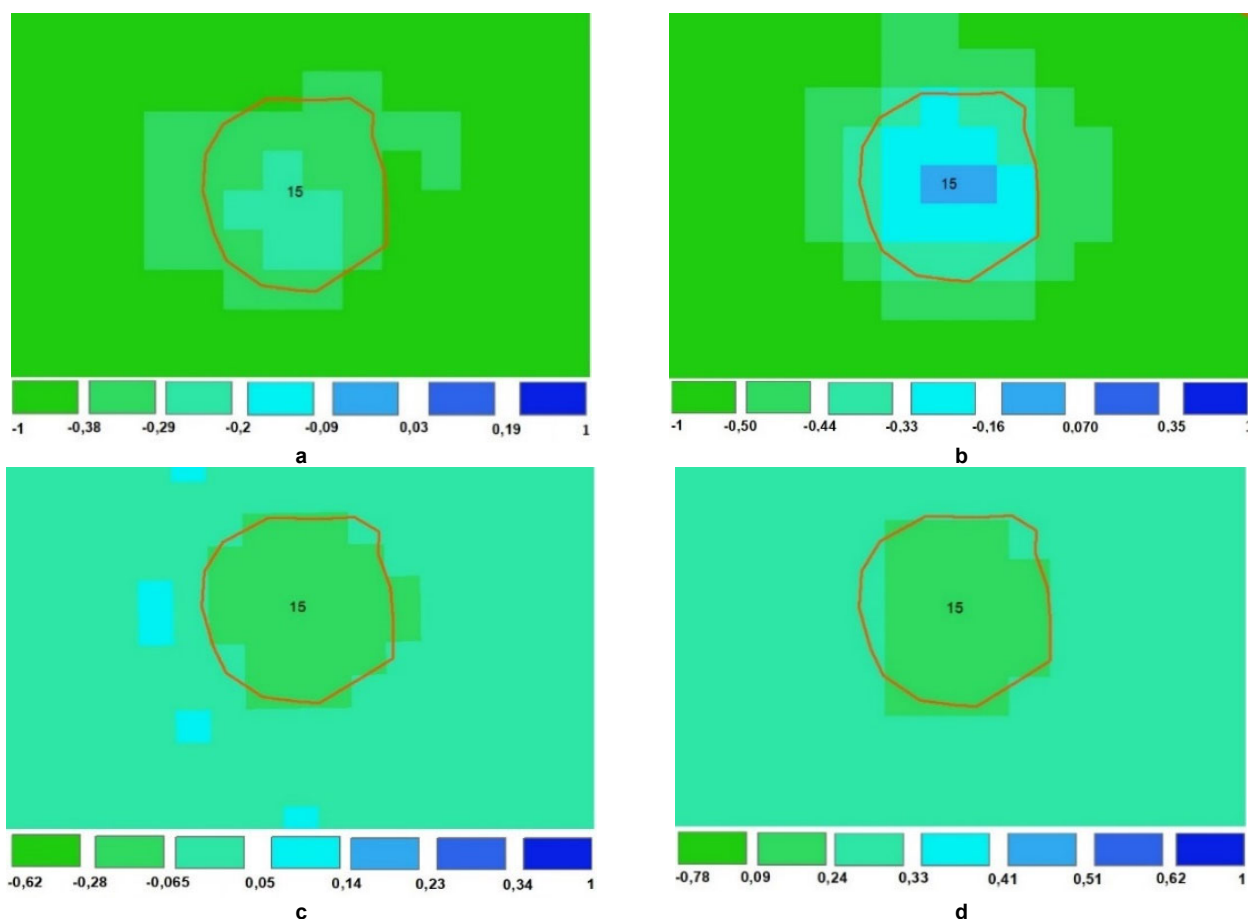


Fig. 8. Cases of range crossing in the photographs:

a – partial coincidence, field 3, plot 15, 44.0 %, NDMI index; b – full match field 3, plot 15, 98.0 %, NDSI index; c – full match field 3, site 15, 98.0 %, NDWI index; d – full match field 3, plot 15, 88.0 %, OSAVI index

Table 1

Identification ability of indices									
№	Name of the index	Test field number and index identification							
		Field 1		Field 2		Field 3		Field 4	
		%	ability	%	ability	%	ability	%	ability
1	NDVI	8 %	low	71 %	increased	83 %	high	83 %	high
2	NDWI	–	–	52 %	average	84 %	high	–	–
3	NDMI	–	–	80 %	increased	44 %	average	–	–
4	OSAVI	–	–	84 %	high	83 %	high	98 %	high

Note: MRLF is not identified

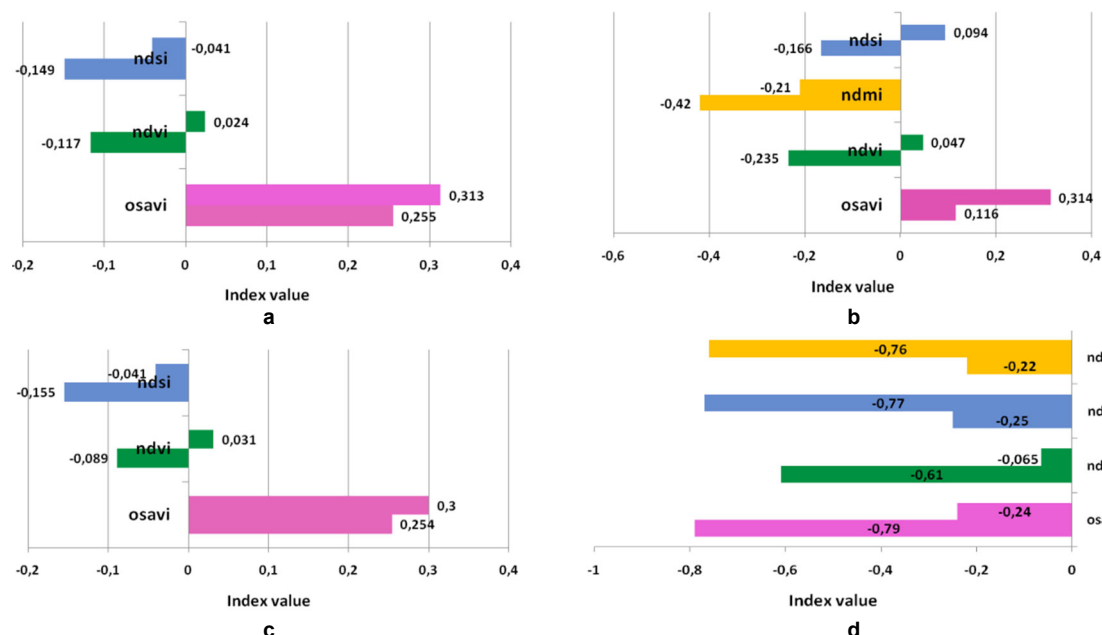


Fig. 9. Ranges of vegetation indices:
a – plot No. 8; b – site No. 15; c – plot No. 16; d – "identifying" ranges for field No. 3

Discussion and conclusions

The results of remote identification of the areas of MRLF, carried out on test fields using the NDWI, NDSI, NDMI, OSAVI indices based on the Sentinel 2A spectrozonal image, made it possible to obtain information on soil moisture of arable lands of Sulymiv territorial community of Boryspil district of Kyiv region. The ability of the specified indices during the geospatial identification of micro-recessed landforms (MRLF) and soil areas within them with signs of hydromorphism was evaluated.

It is shown that the use of orthophotos with a resolution of 0.2 m per 1 pixel is an important auxiliary means of successfully solving the specified tasks.

It was found that the identification ability of water indices on test fields without existing vegetation is too low. On the other hand, the shielding of the soil surface by vegetation with areas of damaged crops makes it possible to isolate MZFR (so-called "saucers").

The most informative ranges of vegetation indices were established: for NDVI, the range is from -0.117 to -0.024 with an identification percentage of 98.0 %; for OSAVI – 78.0 % with a range of 0.255 – 0.313; for NDMI with a range variation of -0.041 to -0.149 and an identification percentage of 56.0.

The obtained information can be used during the development of the methodology of soil science surveying and planning of large-scale soil survey activities.

Authors' contribution: Petro Trofymenko – conceptualization, formal analysis, methodology, review and editing; Olha Tomchenko – conceptualization, methodology; Rostyslav Poralo – formal analysis, data treating; Vitalii Zatserkovnyi – data validation, editing; Iryna Stakhiv – formal analysis, data treating.

References

- Belenok, V., Noszczyk, T., Hebryn-Baidy, L., & Kryachok, S. (2021). Investigating anthropogenically transformed landscapes with remote sensing. *Remote Sensing Applications Society and Environment*, 24, 100635. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100635>.
- Bruce, R. R., Myhre, D. L., & Sanford, J. O. (1968). Water capture in soil surface microdepressions for crop use. *9th Inter. Cong. Soil Sci. Transactions*, 325–330.
- Dovhyi, S., Babliuchuk, S., Kuchma, T., Tomchenko, O., & Yurkiv, L. (2020). *Remote Sensing of the Earth: Analysis of Satellite Images in Geoinformation Systems* [in Ukrainian].

FAO, Rome, AGR, & Statistics, UN/FAO. (2023). Applications of remote sensing to agricultural statistics. Report. XF2006285449. France, Rome & May, 2023.

Gerardo, R., & Lima, I. (2022). Sentinel-2 Satellite Imagery-Based Assessment of Soil Salinity in Irrigated Rice Fields in Portugal. *Agriculture*, 12, 1490. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091490>.

Guang, Li, Liyuan, Zhang, Chaoyang, Song, Manman, Peng, Yu, Zhang, & Han, Wenting. (2019). Extraction Method of Wheat Lodging Information Based on Multi-temporal UAV Remote Sensing Data. *Nongye Jixie Xuebao / Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 50, 211–220. [10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.024](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.024).

Kuchma, T., Tarariko, O., Syrotenko, O., & Iliencko, T. (2019). *Agroecological Satellite Monitoring*. [in Ukrainian].

Malinowski, R., Goswin, H., Rybicki, M., & Eltner, A. (2022). Mapping rill soil erosion in agricultural fields with UAV-borne remote sensing data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48. <https://doi.org/10.1002/esp.5505>.

Martyn, A.G. Osypchuk, S.O., & Chumachenko, O.M. (2015). Natural Agricultural Zoning of Ukraine. CP "Komprint" [in Ukrainian].

Paz-González, A., & Castro, M.T. (1996). Measurement of soil microrelief and estimation of water retention in surface depressions. *Cuadernos Laboratorio Xeoloxico de Laxe*, 21, 829–841.

Romanchuk, I. F. (2018). Determining the Influence of Soil Water Regime on Their Degradation Degree Using Satellite Images and Ground Field Data. *Ukrainian Journal of Earth Remote Sensing*, 17, 26–30 [in Ukrainian].

Sakhatskyi, O. I. (2008). Experience of Using Satellite Data to Assess the State of Soils for Solving Natural Resource Tasks. ISSN 1025-6415. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3 [in Ukrainian].

Sherstniuk, R., Andrushkiv, B., Khrapkina, V., Kyrych, N., & Pohaidak, O. (2021). Experience of Implementing the Development Strategy of Territorial Communities in Post-Conflict Conditions. Strategies for Sustainable Development of Territories in Post-Crisis Recovery [in Ukrainian].

Stanko, Z., Faunt, C., Cromwell, G., & Sweetkind, D. (2019). *Assessing regional groundwater availability in California's coastal basins*.

Starodubtsev, V., Vlasenko, I., & Komarchuk, D. (2017). Influence of Spatial Heterogeneity of the Water Regime of Agrolandscapes on Their Productivity. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 3(67) [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.31548/dopovid2017.03.006>

Starodubtsev, V., Vlasenko, I., Basarab, R., & Komarchuk, D. (2018). Spatial Heterogeneity of Productivity of Typical Chernozems in Fields with Microdepressions. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 3(73) [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.31548/dopovid2018.03.004>

Starodubtsev, V. M., Yatsenko, S. V., Pavliuk, S. D., & Iliencko, V. V. (2009). *Influence of the Water Regime of Microdepressions in the Forest-Steppe on the Heterogeneity of the Soil Cover and Its Use*. FOP Danyluk, 176–179 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 01.12.23

Прорецензовано / Revised: 25.12.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Петро ТРОФИМЕНКО¹, д-р с/г. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-7692-5785

e-mail: trofimenkopetr@ukr.net

Ольга ТОМЧЕНКО², канд. техн. наук, ст.наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-6975-9099

e-mail: tomch@i.ua

Ростислав ПОРАЛО¹, студ.,

e-mail: poralo1995@gmail.com

Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ¹, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0009-0003-5187-6125

e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Ірина СТАХІВ¹, канд. геол. наук, асист.

ORCID ID: 0009-0007-3090-6988

e-mail: stakhivira@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Державна установа "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України", Київ, Україна

ДИСТАНЦІЙНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ МІКРОЗАПАДИННИХ ФОРМ РЕЛЬЄФУ ТА ДІЛЯНОК ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ АГРОЛАНДШАФТІВ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ З ОЗНАКАМИ ГІДРОМОРФНОСТІ

Вступ. Сільськогосподарські угіддя відіграють ключову роль у забезпеченні продовольчої безпеки населення і розвитку економіки країни. Проте значну загрозу для цих земель становить надмірне зволоження, унаслідок чого в межах понижених елементів рельєфу формуються умови для утворення ґрунтів з ознаками оглеєння, низьким рівнем родючості, що значно знижує їхній потенціал. Для висвітлення проблем геопросторової ідентифікації мікрозападинних форм рельєфу (МЗФР) на сільськогосподарських угіддях у статті використано спектральні індекси за даними ДЗЗ.

Методи. Під час досліджень було відібрано 6 спектральних індексів, які використано для отримання даних про ареали просідань ґрунтів на орних землях, а саме: NDWI, NWI, NDMI, NDVI, OSAVI, WRI. Вирішення завдань досліджень передбачало застосування даних супутникової системи Sentinel-2A. Для візуалізації поширення МЗФР на території досліджень використано знімок надвисокої розрізненості (0,2 м на 1 піксель), отриманий у програмному забезпеченні "Digital Professional 5,0". Обробку, геопросторову візуалізацію даних ДЗЗ виконано у середовищі Arc Map програми Arc GIS 10.8 із застосуванням інструмента raster calculator.

Результати. У межах еталонних полів побудовано і проаналізовано динаміку значень водних і вегетаційного індексів та оцінено ідентифікаційну здатність щодо геопросторового виокремлення ареалів ґрунтів з ознаками гідроморфності. Показано, що ідентифікаційна спроможність індексів залежить не лише від рівня зволоженості ґрунту, а також від біомаси рослинності (масштабів пошкодженості посівів), на що вказує висока інформаційна спроможність традиційного вегетаційного індексу NDVI. Встановлено найбільш інформаційні діапазони індексів: для NDVI діапазон в межах від -0,117 до -0,024 з відсотком ідентифікації 98,0 %; для OSAVI – 78,0 % з діапазоном 0,255–0,313; для NDMI з варіацією діапазону від -0,041 до -0,149 та відсотком ідентифікації 56,0.

Висновки. Результати дистанційної ідентифікації ареалів МЗФР дали змогу отримати інформацію про зволоженість ґрунтів орних земель території досліджень. Оцінено здатність означених індексів під час геопросторової ідентифікації мікрозападинних форм рельєфу та ареалами ґрунтів в їх межах з ознаками гідроморфності. Показано, що важливим допоміжним засобом успішного вирішення означених завдань є використання ортофотознімків з розрізненням 0,2 м на 1 піксель.

Виявлено, що ідентифікаційна здатність водних індексів на тестових полях без наявної рослинності є надто низькою. Натомість екранованість ґрунтової поверхні рослинністю з ділянками пошкоджених посівів дозволяє виокремлювати МЗФР.

Отримана інформація може бути використана під час розроблення методики проведення ґрунтознавчої зйомки та планування заходів з широкомасштабного обстеження ґрунтів.

Ключові слова: мікрозападинні форми рельєфу (МЗФР), просідання, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), спектральні індекси вегетації та зволоженості.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 556.38

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.13>

Наталія ЛЮТА, канд. геол.-мінералог. наук

ORCID ID: 0000-0003-4070-0944

e-mail: nlyuta@ur.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ірина САНИНА, мол. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-6592-9625

e-mail: ekogeol@ukr.netДУ "Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних
полігонних досліджень НАН України", Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ТЕРИГЕННИХ ВІДКЛАДАХ ЕОЦЕНУ ТА АЛЬБ-СЕНОМАНУ В БАСЕЙНІ ДНІПРА

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Вступ. Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн є найбільшим в Україні за площею і ресурсами гідрогеологічним регіоном I порядку. Основні прогнозні ресурси в його межах приурочені до водоносного горизонту у відкладах еоцену та водоносного комплексу у відкладах альб-сеноману. Ці горизонт і комплекс є основними – на них базується централізоване водопостачання цілої низки великих населених пунктів, тому вивчення їхнього хімічного складу має виняткове значення. Частини згаданих водоносних горизонтів і комплексу, що мають воду питної якості, ідентифіковано як групи масивів підземних вод (МПЗВ) – об'єкти моніторингу підземних вод, для яких повинні бути визначені екологічні цілі і ризики недосягнення цих цілей. Водночас природний якісний склад води цих груп МПЗВ відзначається значною просторовою неоднорідністю, що необхідно враховувати під час визначення тенденцій його змін та конкретизації екологічних цілей. Метою досліджень було встановити особливості просторового розподілу вод різного хімічного складу. Об'єктом досліджень були водоносні горизонти у відкладах еоцену та альб-сеноману в межах Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну (басейн Дніпра), предметом – хімічний склад води згаданих водоносних горизонтів.

Методи. Для досягнення поставлених цілей було зібрано, узагальнено та проаналізовано дані щодо хімічного складу водоносного горизонту у відкладах еоцену та водоносного комплексу у відкладах альб-сеноману з опублікованих і фондових джерел. Інформацію було опрацьовано із застосуванням геоінформаційних систем, створено базу даних, що дає змогу генерувати спеціалізовані карти та виконувати спільний аналіз даних.

Результати. Досліджено мінералізацію і макрокомпонентний склад підземних вод у теригенних відкладах еоцену та альб-сеноману в басейні Дніпра, встановлено особливості їхнього просторового розподілу. Особливу увагу приділено експлуатаційним ділянкам, де розвідано запаси обох груп МПЗВ. Детально схарактеризовано якісний, у тому числі мікрокомпонентний, склад підземних вод у теригенних відкладах еоцену та альб-сеноману на території м. Чернігова. Визначено особливості формування хімічного складу підземних вод у теригенних відкладах еоцену та альб-сеноману.

Висновки. Встановлено, що незважаючи на те, що обидва МПЗВ перебувають у зоні активного водообміну, вміст макро- і мікрокомпонентів у них досить суттєво відрізняється. Зокрема, у воді в МПЗВ у відкладах альб-сеноману макрокомпонентний склад води більш однотипний, а вміст макро- і мікрокомпонентів вирізняється меншим розмахом коливань.

Визначені особливості природного якісного складу досліджених МПЗВ слід враховувати в процесі проведення моніторингу підземних вод, зокрема при уточненні екологічних цілей та визначенні періодичності спостережень за якісним станом підземних вод.

Ключові слова: Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн, масиви підземних вод у відкладах еоцену, масиви підземних вод у відкладах альб-сеноману, якісний стан підземних вод, мінералізація, гідрохімічна зональність.

Вступ

Дніпровсько-Донецький артезіанський басейн (ДДАБ) є найбільшим за площею і ресурсами гідрогеологічним регіоном I порядку як в Україні, так і на території басейну Дніпра. Він займає майже все лівобережжя і частину правобережжя басейну. Основна частина як прогнозних ресурсів, так і балансових експлуатаційних запасів підземних вод ДДАБ припадає на водоносні горизонти і комплекси у палеогенових і крейдових відкладах. Ці горизонт і комплекс є основними – на них базується централізоване водопостачання цілої низки великих населених пунктів, тому вивчення їхнього хімічного складу має виняткове значення.

Згідно з Методикою визначення масивів поверхневих і підземних вод, затвердженою наказом Міністерства екології та природних ресурсів України 14.01.2019 № 4 (далі – Методика), у процесі підготовки Плану управління річковим басейном Дніпра на його території було виділено масиви підземних вод (МПЗВ) – водоносні горизонти, комплекси, або їхні частини, що вирізняються спільними умовами формування та подібними кількісними і якісними характеристиками. МПЗВ є об'єктами державного моніторингу підземних вод, для них встановлюються екологічні цілі, і вони використовуються для оцінки досягнення цих цілей.

У межах басейну Дніпра було визначено 5 груп безнапірних МПЗВ і 21 напірних (9 груп МПЗВ і 12 МПЗВ) (Гошовський, Санина, & Люта, 2019). Визначення МПЗВ з-поміж безнапірних водоносних горизонтів обґрунтовується їхньою уразливістю до забруднення і зв'язком з поверхневими екосистемами, а напірних – передусім придатністю для централізованого водопостачання, тобто сукупністю відповідних кількісних і якісних характеристик.

Згідно з методичними підходами Водної рамкової директиви ЄС та документами, розробленими для її імплементації, у тому числі й згаданою вище Методикою, для визначення якісного (хімічного) стану МПЗВ передбачено лише два можливих варіанти: "добрий" або "поганий". Критеріями визначення якісного стану МПЗВ є нормативи міжнародних та національних стандартів (ГДК), а також геохімічні фони хімічних елементів і сполук. Розробка концептуальних моделей для оцінки ризику недосягнення МПЗВ доброго якісного стану передбачає обов'язкове встановлення природного фоновому вмісту компонентів хімічного складу води і просторово-часових особливостей поширення та змін вмісту хімічних елементів і сполук. Це необхідно для обґрунтованого пояснення причин виявленого підвищеного вмісту цих компонентів, їхнього походження – природного або антропогенного.

У цьому контексті слід зауважити, що в Україні ресурси підземних вод формуються у складних і неоднорідних природних умовах, що нерідко призводить до перевищення вмісту низки елементів і сполук у підземних водах. Це повною мірою стосується і двох груп МПЗВ, які мають найважливіше значення для водопостачання населення у басейні Дніпра – найбільш поширених і багатих на ресурси підземних вод напірних МПЗВ – у теригенних відкладах еоцену та альб-сеноману (рис. 1, 2). Ці групи МПЗВ займають площі 110 300,0 і 106 800,0 км² відповідно і слугують основним джерелом централізованого водопостачання низки великих населених пунктів. Вони містять питні води високої якості, передусім водоносний комплекс в альб-сеноманських відкладах, який, за оцінками віку води, є резервуаром, заповненим прісною водою в доіндустріальну епоху (Яковлев, 2012, 2015).

Метою досліджень є встановлення особливостей просторового розподілу вод різного хімічного складу. Об'єктом досліджень були водоносні горизонти у відкладах еоцену та альб-сеноману в межах Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну, предметом – хімічний склад води згаданих водоносних горизонтів.

Методи

Для досягнення поставлених цілей було зібрано, узагальнено та проаналізовано дані щодо хімічного складу водоносного горизонту у відкладах еоцену та водоносного комплексу у відкладах альб-сеноману з опублікованих і фондових джерел. Інформацію було опрацьовано із застосуванням геоінформаційних систем, що дає змогу генерувати спеціалізовані карти та виконувати спільний аналіз даних.

Результати

Група МПЗВ у теригенних відкладах еоцену пов'язана з відкладами бучацької світи, подекуди до її складу входять також відклади канівської та київської світи. У покрівлі залягає регіональний водотрив – еоценові мергелі і глини, які захищають МПЗВ від забруднення, а в місцях їхнього розмиву – олігоцені та четвертинні відклади. Підстеляється переважно мергельно-крейдяними породами верхньої крейди.

Водовмісними є переважно середньозернисті піски з прошарками пісковиків, алевролітів і глин. Потужність змінюється від 5–10 до 80–100 м. Глибина залягання водовмісних порід – від 12,5–62,0 м на околицях басейну до 156–331 м у його центральній частині. Величина напору змінюється від 5–15 до 135–333 м. Рівні підземних вод встановлюються на глибині від 1–12 до 56 м і більше, в окремих свердловинах вище від поверхні землі. Дебіти свердловин змінюються від 86 до 2160 м³/д (найчастіше 172,8–259,2 м³/д). Живлення інфільтраційне, відбувається на північно-східній та південно-західній околицях ДДАБ, де водовмісні породи мають неглибоке залягання і перекриті водопроникними піщаними відкладами. Розвантажуються МПЗВ у долині Дніпра, в місцях відсутності водотривких відкладів у покрівлі. У місцях живлення і розвантаження спостерігаються значні сезонні коливання рівня підземних вод – до 0,5–0,9 м, у зануреній частині коливання менш виражені.

Мінералізація вод переважно до 1,0 г/дм³, хімічний склад гідрокарбонатний кальцієвий, кальцієво-магнієвий, кальцієво-натрієвий, подекуди хлоридний кальцієво-натрієвий.

Група МПЗВ є експлуатується великими і середніми водоспоживачами, використовується для централізованого водопостачання міст Чернігова, Прилук, Тростянця, Лебедина, Лубен, Пирятина та ін. У районі Києва

внаслідок перетоку через водороздільний шар у процесі інтенсивної експлуатації водоносних відкладів альб-сеноману верхньої-нижньої крейди в еоценовому горизонті у 80-х рр. минулого сторіччя спостерігалось зниження рівня до 2,7–15 м, нині через значне зменшення видобутку рівень відновився.

Група МПЗВ у теригенних відкладах альб-сеноману – спільний водоносний комплекс утворився через відсутність витриманого водотриву між альбськими і сеноманськими відкладами. Група МПЗВ у теригенних відкладах альб-сеноману поширена в межах всього ДДАБ, за винятком окремих площ (ділянка між Переяславом і Черкасами, Остерсько-Золотоніське підняття, склепіння солянокупольних структур). У межах гідрогеологічної області Українського щита водозбагачені відклади альб-сеноману заповнюють окремі заглиблені палеодолини у кристалічному фундаменті.

Водовмісними є піски дрібно- і тонкозернисті, глинисті, пісковики з прошарками глин (верхня частина товщі) та піски різнозернисті, від середньо- до крупнозернистих, з лінзами пісковиків і стяжіннями кременів у нижній частині товщі. Перекриваються водотривками мергельно-крейдяними відкладами верхньої крейди, а в місцях їхнього розмиву – палеогеновими та четвертинними відкладами. Підстеляються нижньокрейдяними, юрськими, архей-протерозойськими породами.

Потужність – від 7–50 до 75–100 м. Глибина залягання змінюється від 25–50 до 100–150 м, у найбільш зануреній частині ДДАБ до понад 1000 м. Дебіти свердловин становлять від 95,0–950,4 до 2592–4078 м³/д. Води напірні, висота напору змінюється від 10–30 до 70–100 м, сягаючи у центральній частині ДДАБ 500–600 м і більше. Рівні підземних вод встановлюються переважно на глибинах від 15–20 м. Мінералізація води переважно від 0,3 до 0,7 г/дм³, рідко до 4 г/дм³ і вище, хімічний склад гідрокарбонатний кальцієво-магнієвий, кальцієво-натрієвий, гідрокарбонатно-сульфатний натрієвий, у зоні впливу солянокупольних структур хлоридний натрієвий.

На більшій частині свого поширення водоносний комплекс захищений від забруднення потужною монолітною товщею мергелів і крейди верхньої крейди і тому є неуразливим до забруднення.

Підземні води комплексу практично повсюдно в межах свого поширення є основним джерелом централізованого водопостачання, у т. ч. міст Полтави, Чернігова та ін. У районі м. Полтави внаслідок довготривалої експлуатації утворилася депресійна лійка із зниженням рівня в центрі до 30 м. Для централізованого водозабезпечення у м. Києві підземні води використовуються разом із юрськими водоносними відкладами, з якими з якими утворює єдиний водоносний комплекс. Унаслідок інтенсивної експлуатації сеноман-келовейського водоносного комплексу у 70–80 рр. минулого сторіччя тут також утворилося кілька депресійних лійок діаметром від 3–5 до 10–15 км із зниженням рівня підземних вод у центрі до 10–20 м. Після зниження обсягів видобутку рівні відновлюються.

Зважаючи на значні розміри груп МПЗВ у теригенних відкладах еоцену і альб-сеноману, складні умови формування ресурсів підземних вод і відмінності літологічного складу водовмісних порід, природний хімічний склад підземних вод МПЗВ суттєво різняться в різних частинах їхнього поширення. Це слід враховувати у процесі оцінки якісного стану підземних вод. Для дослідження особливостей розподілу підземних вод різної мінералізації та хімічного складу було проаналізовано дані Державного балансу запасів корисних копалин

України (Підземні питні і технічні води) (Державний баланс..., 2017, 2021) стосовно початкової мінералізації та макрокомпонентного складу вод досліджуваних МПЗВ, видані гідрогеологічні карти та фондові матеріали.

Група МПЗВ у відкладах еоцену. На правобережжі та на півночі лівобережжя (Київська, Чернігівська області) води МПЗВ у теригенних відкладах еоцену гідрокарбонатні кальцієві, кальцієво-магнієві, мінералізація переважно в межах 0,2–0,5 г/дм³. У південно-східному напрямку мінералізація поступово зростає, а в хімічному складі збільшується частка хлоридів і натрію. Практично на всій території Полтавщини хімічний склад вод в еоценових відкладах гідрокарбонатно-хлоридний або хлоридно-гідрокарбонатний натрієвий, мінералізація 0,6–1,5 г/дм³, у межах впливу солянокупольних структур (зокрема м. Ромни Сумської обл., с. Ісачки Полтавської обл.) – до 2,8–5,0 г/дм³. Для еоценового водоносного горизонту на території Полтавщини характерна наявність підвищеного вмісту фтору – 3–5 мг/дм³, подекуди до 9 мг/дм³, зумовленого присутністю фосфоритів у водовмісних породах (Жовинский та ін., 2001).

На південь від Харкова зафіксовані хлоридно-гідрокарбонатні натрієві води з мінералізацією до 2,0 г/дм³. У південно-східній частині басейну на межі з Донбасом поширені сульфатно-гідрокарбонатні, гідрокарбонатно-сульфатні магнієво-кальцієві води з мінералізацією 2–3 г/дм³ і більше, в яких збільшення вмісту сульфатів відбувається за рахунок вилугування пермських порід, які тут залягають на незначній глибині.

У долині Дніпра (від Кременчука до Павлограду) поширені води з мінералізацією від 2,6 до 3–4, іноді до 5–15 г/дм³, хлоридного натрієвого складу. В цих же районах і в нижній течії р. Самара і Оріль мінералізація вод підвищується від 2 до 7–8 г/дм³, подекуди до 10 г/дм³ і більше. За хімічним складом це хлоридні натрієві води, походження яких також найімовірніше пов'язане з підтоком високомінералізованих (до 60 г/дм³) напірних вод палеозою по тектонічних порушеннях.

Отже, хімічний склад води МПЗВ в еоценових відкладах формується в результаті впливу горизонтальної, вертикальної гідрохімічної зональності та солянокупольних структур (рис. 1).

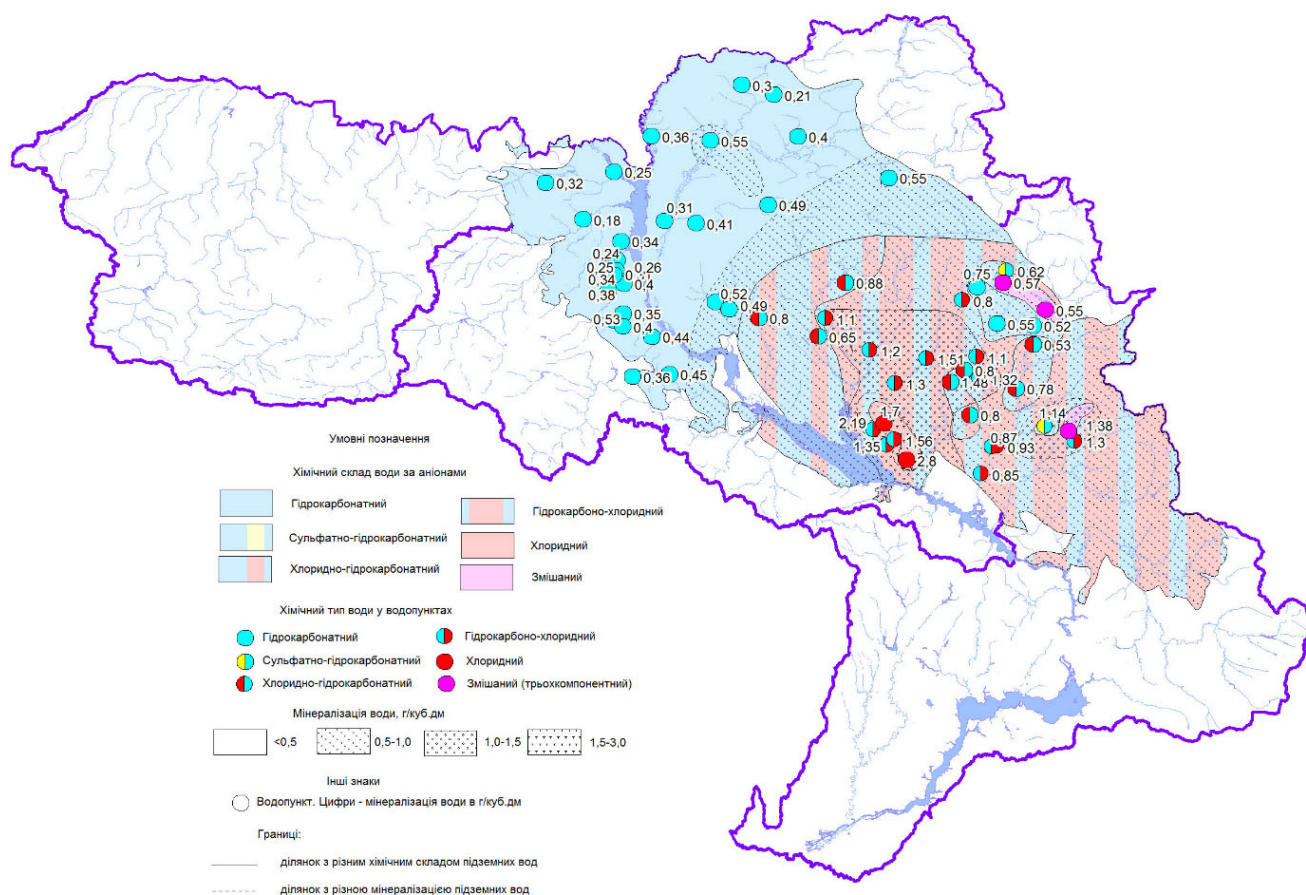


Рис. 1. Природний хімічний склад підземних вод МПЗВ у відкладах еоцену в межах басейну Дніпра

Група МПЗВ у відкладах альб-сеноману. Хімічний склад підземних вод групи МПЗВ у відкладах альб-сеноману закономірно змінюється від північно-східної до південно-західної частин басейну з гідрокарбонатних кальцієво-магнієвих вод з мінералізацією 0,3–0,4 г/дм³ до хлоридних натрієвих з мінералізацією до 2,8–3,7 г/дм³ і більше.

Південніше лінії Гребінки–Лубни–Миргород–Опішня поширені хлоридні натрієві води з мінералізацією 4–10 г/дм³, у районі Миргорода – 2,6–3,7 г/дм³. У районі

Диканьки, Полтавки та Решетилівки виділяються хлоридно-гідрокарбонатні натрієві води з мінералізацією 0,5–1,0 г/дм³. У східній частині басейну поширені переважно прісні води з мінералізацією 0,5–1,0 г/дм³ гідрокарбонатно-сульфатного, гідрокарбонатно-хлоридного натрієвого складу.

У районі м. Харкова мінералізація вод сягає 0,6–1,3 г/дм³, тут у макрокомпонентному складі переважають гідрокарбонатні, подекуди сульфатні і хлоридні

іони. На південному сході басейну переважають сульфатно-гідрокарбонатні натрієво-кальцієві води з мінералізацією до 0,7 г/дм³, подекуди сульфатно-хлоридні натрієві і хлоридні магнієво-натрієві з мінералізацією 1,6–2,2 г/дм³.

Порівняно з еоценовим макрокомпонентний склад води альб-сеноманського комплексу більш рівномірний. На більшій частині території переважають води з мінералізацією до 1,0 г/дм³, хімічний склад гідрокарбонатний і гідрокарбонатно-хлоридний, з-поміж катіонів одноосібно домінує натрій (рис. 2).

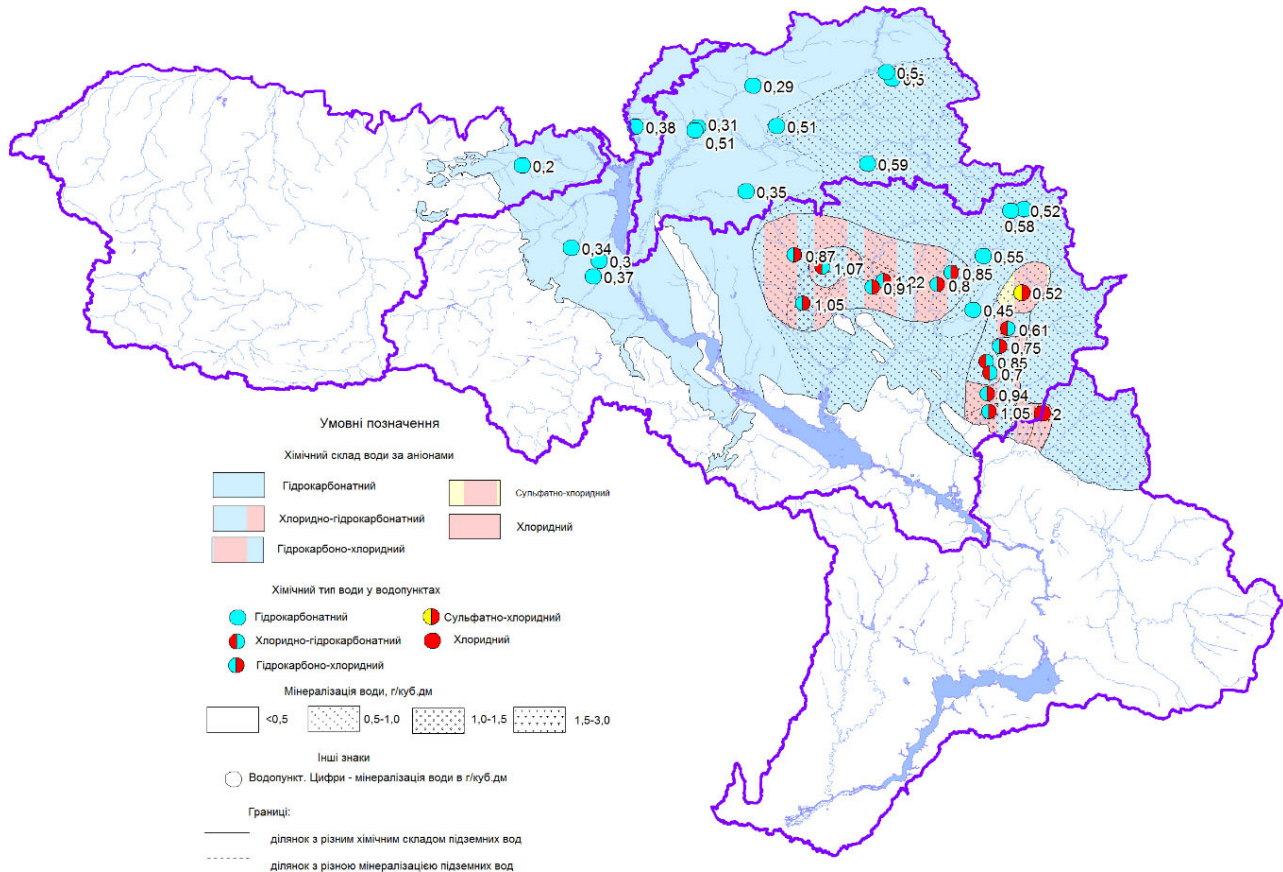


Рис. 2. Природний хімічний склад підземних вод МПЗВ у відкладах альб-сеноману в межах басейну Дніпра

Аналіз даних по ділянках, де розвідані запаси вод обох груп МПЗВ. На низці експлуатаційних ділянок (Державний баланс..., 2017, 2021) існують водозабори, облаштовані на обидві досліджувані групи МПЗВ. Дані стосовно деяких ділянок наведено в табл. 1. Зіставлення даних щодо мінералізації та хімічного складу води у межах таких ділянок дало змогу встановити таке.

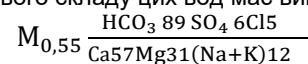
Покрівля водоносного комплексу у відкладах альб-сеноману у різних частинах ДДАБ фіксується на 100–800 м глибше за покрівлю водоносного горизонту у відкладах еоцену, проте обидві досліджувані групи МПЗВ належать до зони активного водообміну. Їхні води переважно прісні, водночас середні значення початкової мінералізації практично однакові, винятком є водозабір на Полтавщині, де висока мінералізація (до 2,0 г/дм³) у воді альб-сеноманських відкладів є, очевидно, наслідком впливу солянокупольної тектоніки у межах відповідного інтервалу глибин. Близький хімічний склад вод обох досліджуваних груп МПЗВ, враховуючи наявність між ними регіонального водотриву – монолітної мергельної товщі верхньої крейди, пояснюється однаковим інфільтрогенним походженням, спільними областями живлення і схожістю водовмісних порід.

Водночас на територіях Чернігівської та Сумської областей, у межах крайових частин ДДАБ, відмінністю

хімічного складу води у відкладах еоцену є більше розмаїття хімічного складу і більший розмах варіації мінімальної і максимальної мінералізації порівняно з водою комплексу альб-сеноманських відкладів. Хімічний склад води альб-сеноману вирізняє більш витриманий вміст макрокомпонентів, яскраво виражене переважання в катіонному складі натрію і в більшості випадків – менші відмінності між мінімумом і максимумом мінералізації, що, очевидно, відображає більш усталені й однорідні умови формування. На території Полтавської області, в межах осьової частини ДДАБ і суттєвого впливу солянокупольної тектоніки, макрокомпонентний склад і мінералізація обох МПЗВ практично ідентичні.

Найбільш детально хімічний склад вод МПЗВ у відкладах еоцену та альб-сеноману було вивчено на території м. Чернігова (Лысяный, 1996), де ці води використовуються для централізованого водопостачання (табл. 2, 3).

Тут води водоносного горизонту бучацької світи еоцену $P_{2b\delta}$ прісні (мінералізація 0,43–0,68 г/дм³), слабко лужні (pH 7,5–8,3), гідрокарбонатні магнієво-кальцієві. Формула сольового складу цих вод має вигляд



Таблиця 1

**Мінералізація та хімічний склад підземних вод водоносних горизонтів
в еоценових та альб-сеноманських відкладах у межах спільних експлуатаційних ділянок**

Родовище, ділянка, населений пункт	Водоносний горизонт, геол. індекс	Водовмісні породи	Глибина, покрівля – підшва, м	Початкова мінералізація, інтервал, г/дм ³	Хімічний склад
Чернігівська обл.					
Славутицьке, Неданчицька, с. Неданчичі	P ₂	Пісок др/з	71–155	0,28–0,43	ГНМК
	K ₁ +K ₂ s	Пісок др/з	175–250	0,32–0,43	ГНМК
Чернігівське, Бобровицька, м. Чернігів	P ₂	Пісок р/з	102–270	0,23–0,49	ГНМК
	K ₁ +K ₂ s	Пісок р/з	648–720	0,23–0,39	ГН
Чернігівське, Ялівщинська, м. Чернігів	P ₂	Пісок р/з	78–260	0,24–0,54	ГМК
	K ₁ +K ₂ s	Пісок р/з	612–715	0,31–0,48	ГМКН
Щорське, Щимельська, м. Снов	P ₂ bc	Пісок р/з	54–71	0,14–0,24	ГН
	K ₁ +K ₂ s	Пісок р/з	361–419	0,29–0,3	ГН
Сумська обл.					
Охтирське, д. Охтирська, м. Охтирка	P ₂ bc	Пісок р/з	66–85	0,51–0,86	ГХ МНК
	K ₁ +K ₂ s	Пісковик	727–886	0,58–0,79	ГН
Конотопське, д. Конотопська, м. Конотоп	P ₂ (kn+bc)	Пісок др/з	49–115	0,4–0,7	ГМК
	K ₁ +K ₂ s	Пісок р/з	489–645	0,5–0,6	ГН
Токарівське, Токарівська, с. Токарі	P ₂ (kn+bc)	Пісок р/з	54–68	0,48–0,65	ГН
	K ₁ +K ₂ s	Пісок з глиною	629–750	0,42–0,61	ГН
Лебединське, д. Лебединська, м. Лебедин	P ₂ (kn+bc)	Пісок з глиною	34–120	0,53–0,7	СГ НК
	K ₁ +K ₂ s	Пісок р/з	712–875	0,5–0,6	ГН
Полтавська обл.					
Сарське, Сарська, м. Гадяч	P ₂ (kn+bc)	Пісок др/з	198–217	0,6–1,0	ГХ Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок др-с/з	1017–1097	0,6–1,0	ГХ Н
Гадяцьке, Гадяцька, м. Гадяч	P ₂ (kn+bc)	Пісок др/з	170–201	0,75–0,85	ХГ Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок р/з		0,44–0,56	ХГ Н
Стасівське, Стасівська, с. Стасі	P ₂ (kn+bc)	Пісок др/з	193–220	0,72–0,82	ХГ Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок др/з	758–905	0,62–0,74	ХГ Н
Зіньківське, Зіньківська, м. Зіньків	P ₂ (kn+bc)	Пісок др/з	140–163	0,35–0,51	Г Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок з глиною	936–1067	0,36–0,54	Г Н
Карлівське, Центральна, м. Карлівка	P ₂ (kn+bc)	Пісок т-др/з	131–167	1,38–1,39	ГСХ Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок кварц.	562–702	1,9–2,0	Х Н
Котелевське, Котелевська, смт Котельва	P ₂ (kn+bc)	Пісок	172–200	0,42–0,64	ХГ Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок з глиною	993–1192	0,54–0,67	ХГ Н
Харківська обл.					
Красноградське Берестівська, м. Красноград	P ₂ (kn+bc)	Пісок кварцово- глауконітовий	93–150	0,56–1,2	ГХ Н
	K ₁ +K ₂ s	Пісок з пісковиком	497–580	1,09–1,67	ГХ Н

Такі води властиві верхнім частинам артезіанських басейнів в умовах гумідного клімату за наявності у водовмісних відкладах продуктів вивітрювання алюмосилікатів.

Упродовж спостережного періоду варіації вмісту макрокомпонентів були незначні. У сольовому складі бучацького горизонту різко домінують гідрокарбонати кальцію і магнію – до 88 % загальної суми солей, для них характерний підвищений вміст калію – до 15–16 мг/дм³ і високий вміст кремнієвої кислоти – до 55–62 мг/дм³, що перевищує ГДК.

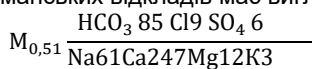
Інколи у водах бучацького горизонту, у центральній і східній частинах Чернігова (Словщина (насосна станція (н.с.). № 1) і Бобровиця (н.с. № 3) фіксувався підвищений вміст нітратів – до 2,4 мг/дм³ при фоновому 0,2 мг/дм³.

У бучацькому водоносному горизонті порівняно з крейдовим спостерігаються більш відчутні сезонні варіації за рахунок змін вмісту карбонату кальцію.

Водоносний горизонт альб-сеноманських відкладів K₁+K₂s залягає під потужною водотривкою мергельно-крейдовою товщею починаючи з глибин 550–650 м. Води цього горизонту прісні (мінералізація 0,42–0,58 г/дм³), лужні (рН 8,0–8,7), гідрокарбонатні натрієві і кальцієво-натрієві.

У сольовому складі водоносного комплексу альб-сеноманських відкладів переважає сода – до 61 % суми солей, у середньому 50 %, відповідно, вищий рН, що навіть на окремих водозаборах (н.с. № 3 і 4) призводить до зрушення карбонатної рівноваги і появи у воді карбонат-іону (12–18 мг/дм³).

Формула сольового складу вод водоносного комплексу альб-сеноманських відкладів має вигляд



Під час еколого-геохімічних досліджень території м. Чернігова у 90-х рр. минулого сторіччя було досить

детально вивчено мікрокомпонентний склад підземних вод. Інтервали і середній рівень вмісту мікрокомпонентів у водоносному горизонті буцацької світи еоцену та водоносного комплексу сеноман-нижньокрейдових відкладів наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Усереднений макрокомпонентний склад підземних вод водоносних горизонтів м. Чернігова

Водоносний горизонт (комплекс)	Мінералізація, мг/дм ³	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂	Жорсткість
ГДК	1000				200		0,5	50	0,1	250	250		10	7,0
Фізіологічна повноцінність	200–500		25–75	10–50	2–20	2–20								
P ₂ bĈ	550	8,1	74	24	9	15	0,1	1,0	0,01	10	19	360	37	5,67
K ₂ s-K ₁	510	8,3	29	9	85	7	0,1	1,0	0,01	21	17	323	16	2,19

Таблиця 3

Вміст металів у підземних водах водоносних горизонтів м. Чернігова

№ н.с.	Водоносний горизонт (комплекс)	Інтервал вмісту/середній вміст							
		Fe мг/дм ³	Mn мг/дм ³	Pb мкг/дм ³	Cu мкг/дм ³	Zn мкг/дм ³	Ni мкг/дм ³	Co мкг/дм ³	Cd мкг/дм ³
	ГДК	0,2	0,05	10	1000	1000	20	100	1,0
1	P ₂ bĈ	0,34–3,74 0,45	0,07–0,20 0,14	5–238 12	4–98 25	10–425 43	5–47 12	5–15 10	0,5–1,0 1,0
	K ₂ s-K ₁	0,21–0,79 0,39	0,02–0,19 0,04	10–105 10	5–37 25	10–133 34	5–34 12	5–13 10	0,5–1,0 1,0
2	P ₂ bĈ	0,1–0,63 0,33	0,11–0,15 0,13	5–15 7,2	5–50 18	10–46 22	5–43 12	5–13 7	0,5–1,0 0,5
	K ₂ s-K ₁	0,16–0,43 0,25	0,01–0,07 0,016	5–12 7	5–34 13	10–48 10	5–58 12	10 10	0,5–1,0 0,5
3	P ₂ bĈ	0,16–0,45 0,20	0,05–0,14 0,09	5–50 30	9–39 27	10–107 21	5–36 20	10 10	0,5–1,0 0,5
4	P ₂ bĈ	0,13–0,50 0,34	0,08–0,19 0,15	5–30 12	5–35 13	10–43 16	5–49 22	10 10	0,5–0,9 0,5
	K ₂ s-K ₁	0,1–0,24 0,17	0,01–0,03 0,02	5–10 7	5–21 12	10–72 12	5–32 20	10 10	0,5–0,8 0,5

З наведених даних випливає, що для підземних вод у відкладах буцацької світи еоцену характерний понад-нормовий вміст заліза (понад 0,2 мг/дм³) – від 0,1 до 3,74, у середньому 0,35 мг/дм³ і марганцю (понад 0,05 мг/дм³) – від 0,05 до 0,2, у середньому 0,135 мг/дм³. У підземних водах альб-сеноманських відкладів залізо також перевищує нормативний вміст, хоча він і менший, ніж у буцацькому горизонті – від 0,1 до 0,79, середній 0,25 мг/дм³. Вміст марганцю у воді альб-сеноманського комплексу також інколи перевищує нормативний, коливаючись від 0,01 до 0,19, середній 0,027 мг/дм³. Крім того, у воді буцацького водоносного горизонту відзначене повсюдне незначне перевищення нормативу вмісту свинцю, у середньому 0,011 мг/дм³, у той час як у воді альб-сеноманського водоносного комплексу середній вміст свинцю становив 0,008 мг/дм³. Слід зазначити, що підвищений вміст заліза і марганцю є характерною рисою підземних вод цієї частини ДДАБ, як ґрунтових вод, так і глибоких безкисневих напірних водоносних горизонтів. Такі природні особливості хімічного складу води обох досліджуваних МПЗВ зумовлюють потребу здійснення водопідготовки для доведення її до нормативного вмісту металів перед подаванням населенню. Водночас за вмістом кальцію, магнію, натрію, калію та показником жорсткості води відповідають вимогам до фізіологічної повноцінності (дод. 4 до Державних санітарних норм і правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10)).

Загалом вміст низки мікрокомпонентів-комплексотворювачів – заліза, марганцю, свинцю, міді, цинку у воді МПЗВ в еоценових відкладах є вищим, ніж у воді альб-сеноманських відкладів. Щодо вмісту нікелю, кобальту та кадмію, він таких закономірностей не виявляє, є однаково низьким у воді обох МПЗВ. У той же час деякі катіогенні елементи (барій, літій) і аніогенні (ванадій, молібден) у вищих концентраціях спостерігаються у воді МПЗВ у альб-сеноманських відкладах.

Слід зауважити, що як для макрокомпонентів, так і для більшості досліджених мікрокомпонентів характерним є значно більший розмах варіації їхнього вмісту у воді МПЗВ в еоценових відкладах порівняно з МПЗВ у альб-сеноманських відкладах, що відображає більш усталені умови формування ресурсів останнього.

Дискусія і висновки

Хімічний стан МПЗВ в еоценових і альб-сеноманських відкладах формується під впливом низки природних чинників. Перебуваючи в зоні активного водообміну, досліджені групи МПЗВ зазнають впливу природної географічної зональності, що відображається у збільшенні мінералізації та зміні аніонного складу з гідрокарбонатного на строкатий, з переважанням хлоридів з північного заходу на південний схід.

Зіставлення хімічного складу води груп МПЗВ в еоценових і альб-сеноманських відкладах у межах експлуатаційних ділянок, де розвідані запаси обох МПЗВ, свідчить про однакове інфільтрогенне походження, спільні області живлення і схожість складу водовмісних

порід. Водночас уже в цій гідродинамічній зоні починає спостерігатися і вертикальна гідрохімічна зональність, яка проявляється у зміні катіонного складу (переважання іону натрію) і загалом більш однорідному макрокомпонентному складі, а також у меншому розмаху варіації вмісту розчинених солей.

На водозаборах м. Чернігова відзначаються певні закономірності у розподілі мікрокомпонентів, а саме вищий вміст елементів-комплексотворювачів у воді МПЗВ у відкладах еоцену порівняно з водою з альб-сеноманських відкладів. Водночас у воді останніх відзначаються підвищені концентрації катіоногенних та аніоногенних елементів. Розмах варіації більшості досліджених мікрокомпонентів, як і у випадку з макрокомпонентами, також більший у воді верхнього МПЗВ в еоценових відкладах.

За вмістом більшості компонентів досліджені води відповідають нормативам ДСанПіН 2.2.4-171-10, однак часте перевищення нормативів за вмістом заліза, марганцю, а подекуди свинцю, фтору, мінералізації та інших компонентів вимагає термінового відновлення моніторингових спостережень.

Встановлені особливості формування хімічного складу вод будуть використані у процесі моніторингу підземних вод і дозволять визначити періодичність спостережень, а також уточнити екологічні цілі для досліджених груп МПЗВ.

Внесок авторів: Наталія Люта – концептуалізація, методологія, написання (оригінальна чернетка); Ірина Саніна – валідація даних, методологія, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

- Гошовський, С., Саніна, І., & Люта, Н. (2019). Ідентифікація і розмежування масивів підземних вод у басейні річки Дніпро, Україна. *Заключний звіт*. https://www.euwipluseast.eu/images/2019/04/GWB-Delineation-DNIPRO-UA_final.pdf
- Державний баланс корисних копалин України. (2017). Питні підземні води. ДНВП "Геоінформ України".
- Державний баланс корисних копалин України. (2021). Питні підземні води. ДНВП "Геоінформ України".
- Жовинський, Е. Я., Кураєва, І. В., Крюченко, Н. О., & Дмитренко, А. Е. (2001). Геологоструктурні та геохімічні умови формування фтороносних провінцій України. *Мінералогічний журнал*, 23, 5/6, 31–36.
- Колябіна, І. Л., Шестопалов, В. М., & Кастельцева, Н. Б. (2021). Механізми формування хімічного складу питних підземних вод Київського родовища (на прикладі водозабору "Оболонь"). *Геологічний журнал*, 2, 24–46.

Natalia LYUTA, PhD (Geol. & Mineral.)

ORCID ID: 0000-0003-4070-0944

e-mail: nlyuta@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Iryna SANINA, Junior Researcher

ORCID ID: 0000-0002-6592-9625

e-mail: ekogeol@ukr.net

SI Radio-environmental Center of the National Academy of Sciences of Ukraine (SI REC NASU), Kyiv, Ukraine

PECULIARITIES OF GROUNDWATER CHEMICAL COMPOSITION IN EOCENE AND ALBIAN-CENOMANIAN TERRIGENOUS SEDIMENTS IN THE DNIPRO BASIN

Background. The Dniprovsko-Donetskyi Artesian Basin is the largest hydrogeological region of the first order in Ukraine in both area and resources. The main forecasted resources within its boundaries are confined to the Eocene aquifer and the Alb-Cenomanian aquifer complex. These aquifer and complex are the principal ones - they are the basis for centralized water supply of a number of large settlements, so studying their chemical composition is of exceptional importance. The parts of the mentioned aquifer and complex that contain drinking water are identified as groundwater bodies (GWBs) – groundwater monitoring objects for which environmental objectives and risks of failure to achieve these objectives should be determined. At the same time, the natural water quality composition of these groundwater bodies groups is characterized by significant spatial heterogeneity, which should be taken into account when determining trends in its changes and specifying environmental objectives. The aim of the study was to establish the peculiarities of the spatial distribution of water with different chemical composition. The object of the study was aquifers in Eocene and Alb-Cenomanian sediments within the Dniprovsko-Donetskyi artesian basin (Dnipro River Basin), and the subject was the chemical composition of water in these aquifers.

Methods. To achieve these purposes, data on the chemical composition of the aquifer in the Eocene sediments and the aquifer complex in the Alb-Cenomanian sediments were collected, summarized and analyzed from published and fund sources. The information was processed using geographic information systems, and a database was created to generate specialized maps and perform joint data analysis.

Results. In the article the mineralization and macrocomponent composition of groundwater in the terrigenous sediments of the Eocene and Albian-Cenomanian of the Dnipro basin are investigated and the peculiarities of their spatial distribution are established. Particular attention is paid

Кошлякова, Т. О. (2011). Зміни хімічного складу питних підземних вод м. Києва в процесі експлуатації. *Збірник наукових праць ІГН НАН України*, 4, 84–89.

Лысяный, Н. Н. (1996). Гидрохимические исследования в пределах жилищно-промышленной агломерации г. Чернигова и прилегающих районов. *Отчет ГРПП "Севгеология"*.

Соболевский, Э. Э. (1981). Обобщение материалов по перспективной оценке эксплуатационных запасов подземных вод Украинской ССР. *Отчет. ЦТЭ*.

Стан підземних вод. (2021). Щорічник. Державна служба геології та надр України. ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України".

Яковлев, В. В. (2015). Закономірність формування сольового складу природних вод зони активного водообміну України. *Вісник ХНУ. Геологія, географія, екологія*, 43, 93–100.

Яковлев, В. В. (2012). Залишкові запаси реліктових прісних вод у колекторах української частини Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 20, 134–138.

References

- Goshovsky, S., Sanina, I., & Lyuta, N. (2019). Identification and delimitation of groundwater bodies in the Dnipro River basin, Ukraine. *Final report* [in Ukrainian]. https://www.euwipluseast.eu/images/2019/04/GWB-Delineation-DNIPRO-UA_final.pdf
- Kolyabina, I. L., Shestopalov, V. M., & Kasteltseva, N. B. (2021). Chemical composition of drinking groundwater of Kyiv deposit formation mechanisms (on the example of Obolon water intake). *Geological Journal*, 2, 24–46 [in Ukrainian].
- Koshlyakova, T. O. (2011). Changes in the chemical composition of drinking groundwater in Kyiv during operation. *Coll. Science. etc. IGS NAS of Ukraine*, 4, 84–89 [in Ukrainian].
- Lysyanyi, N.N. (1996). Hydrochemical studies within the limits of the Chernigov residential and industrial agglomeration and adjacent areas. *Report.SRGP "Sevgeologiya"* [in Russian].
- Sobolevsky, E.E. (1981). Generalization of materials on the prospective assessment of exploitable groundwater reserves in the Ukrainian SSR. *Report. CTE* [in Russian].
- State balance of minerals of Ukraine. (2017). Drinking groundwater. SSPE "Geoinform of Ukraine" [in Ukrainian].
- State balance of minerals of Ukraine. (2021). Drinking groundwater. SSPE "Geoinform of Ukraine" [in Ukrainian].
- State of groundwater. (2021). Yearbook. State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. State Information Geological Fund of Ukraine [in Ukrainian].
- Zhovinsky, E. Ya., Kuraeva, I. V., Kryuchenko, N. O., & Dmytrenko, A. E. (2001). Geological and geochemical conditions of the formation of fluorine-bearing provinces of Ukraine. *Mineralogical Journal*, 23, 5/6, 31–36 [in Ukrainian].
- Yakovlev, V. V. (2015). Regularity of formation of the salt composition of natural waters of the active water exchange zone of Ukraine. *Bulletin of KHNu. Ser. Geology, Geography, Ecology*, 43, 93–100 [in Ukrainian].
- Yakovlev, V. V. (2012). Residual reserves of relict freshwater in the reservoirs of the Kyiv. *Collection of scientific papers of the Institute of Environmental Geochemistry*, 20, 134–138 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 25.04.23

Прорецензовано / Revised: 15.10.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

to the areas where the exploitation reserves of both groundwater aquifers are explored. The qualitative, including microcomponent, composition of groundwater in terrigenous sediments of the Eocene and Albion-Cenomanian in Chernigiv City was characterized in detail. Peculiarities of formation of the chemical composition of groundwater in terrigenous sediments of the Eocene and Albion-Cenomanian were established.

C o n c l u s i o n s . It has been established that despite the fact that both GWBs are located in the zone of active water exchange, the content of macro- and microcomponents in them is quite different. In particular, in the water in the Alb-Cenomanian sediments, the macrocomponent composition of water is more homogeneous, and the content of macro- and microcomponents is characterized by a smaller range of variation.

The identified peculiarities of the natural quality composition of the studied GWBs should be taken into account in the process of groundwater monitoring, in particular, when specifying environmental objectives and determining the frequency of groundwater quality state observations.

K e y w o r d s : Dniprovsko-Donetsky artesian basin, groundwater bodies in Eocene sediments, groundwater bodies in Albion-Cenomanian sediments, groundwater quality state, mineralization, hydrochemical zoning.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

УДК 556.3:504

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.14>

Mykola PANASIUK¹, PhD (Techn.)
ORCID ID: 0000-0003-3607-344X
e-mail: nipanasyuk53@gmail.com

Natalia SOSONNA¹, Junior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9913-3457
e-mail: natalyasosonnaya@gmail.com

Ihor KOVALENKO¹, PhD Student. Junior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6793-595X
e-mail: maddoc01001@gmail.com

Mykhailo BUZYNNYI², DSc (Biol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0003-2812-573X
e-mail: michael.buzinny@gmail.com

Oleksii SHEVCHENKO³, DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-5791-5354
e-mail: shevch62@gmail.com

¹Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of NAS of Ukraine, Chornobyl, Ukraine

²SI "O.M. Marzieiev Institute for Public Health", NAMSU, Kyiv, Ukraine

³Ukrainian Hydrometeorological Institute (UHMI), Kyiv, Ukraine

A PERMANENT MATHEMATICAL MODEL OF FILTRATION AND MIGRATION CONDITIONS BETWEEN THE PRIPYAT AND UZH RIVERS OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Background. Over the past 8–10 years, the radio-hydroecological and hydrogeological conditions of the Chornobyl Exclusion Zone have changed significantly. Under the influence of the decommissioning of the water-containing cooler, the levels, speed and direction of movement of groundwater have changed on a regional scale. New radiation-hazardous objects were created: Storage of spent nuclear fuel (SSNF-2) and Centralized storage of spent nuclear fuel (CSSNF). The impact of climate change on the regime of water bodies has also increased. To study the impact of radiation-hazardous objects on the water environment of the exclusion zone, to forecast changes in hydrogeological conditions under the influence of climate change and man-made loads, it is necessary to create an updated model of filtration and migration conditions with the possibility of its further adjustment and improvement.

Methods. In creating and developing a constant mathematical model based on the finite difference method, the geological and hydrogeological conditions of the research area were considered. Spatial constructions were also carried out to visualize the geological structure using GIS technologies. The filtering scheme was drawn up for computational operations. The QGIS program was used to construct the surfaces of geological horizons, and the Visual MODFLOW program was used to develop the filtration model.

Results. A model of filtration and migration conditions of the Pripyat-Uzh interfluvium of the Chornobyl Exclusion Zone was constructed. The distribution of groundwater levels and heads in the Buchach aquifer was obtained. Forecasts of the paths, directions and time limits of the spread of pollutants with underground water from radiation-hazardous objects have been made. We carried out forecasts of the impact of changes in the boundary conditions of the aquifer on the hydrodynamic parameters of groundwater to justify project decisions on improving the network of observation wells and determining the conditions of flooding of the Chornobyl nuclear power plant site. Forecasts of the impact of global warming on the underground water regime have been carried out.

Conclusions. The forecast field of pressure distribution demonstrates the possibility of improving the radiological state of groundwater as a result of: increasing the thickness of the aeration zone and its sorption capacity and accelerating self-purification due to the growth of underground flow gradients. It is important that the unloading of polluted groundwater will not take place in the Pripyat River, but in the isolated residual lakes of the former cooling pond. It will take about 20 years for groundwater to reach the lakes from the Chornobyl nuclear power plant site.

Keywords: geofiltration model, finite-difference method, numerical modeling, groundwater level, filtration coefficient, Chornobyl Exclusion Zone

Background

Many radiation-hazardous facilities were designed, built, and operated in the Chornobyl Exclusion Zone. To study the impact of these objects on the environment, forecasting changes in hydrogeological conditions under the influence of climate change and man-made loads, it is necessary to create a permanent model of filtration and migration conditions between the Pripyat-Uzh rivers of Chornobyl Exclusion Zone.

At the end of the 90-s of the last century and the beginning of the 2000-s, the main attention was paid to modeling the migration of strontium-90 into groundwater and Pripyat River from local radioactive waste disposal facilities, which are considered the most dangerous ones (Smith, & Gaganis, 1998). Another popular object of modeling was the area around the cooling pond of the Chornobyl Nuclear Power Plant (ChNPP), which was planned to be drained. Therefore, many predictive models of the distribution of groundwater pressures were performed for various scenarios of water

removal. In the first case, detailed models were created, and parameterized according to research results. One of the most famous models was created for the training ground near the burial in trench No. 22-T of the "Red Forest" Point of temporary localization of radioactive waste (PTLRW) (Bugai, Dzhepo, & Skalskyy, 1998; Bugai et al., 2001, 2012, 2018, Shabalin, 2023). In the second case, a model of the Uzh-Pripyat interfluvium and a more detailed local model around the cooling pond, including the section between it and the Pripyat River, were created (Bugai et al., 2018, 2019). However, after the descent of the cooling pond of the ChNPP and the effects of global warming on GWT in 2014–2019, hydrogeological models for this area were not created.

Modern information technologies for modeling hydrogeological objects allow to fully automate the entire modeling process, namely, from the creation of the model to the presentation of the results of the forecast of natural and anthropogenic processes (Bukaty, 2008; Sato, 2022). Currently, there are a large number of modeling systems

© Panasiuk Mykola, Sosonna Natalia, Kovalenko Ihor, Buzynnyi Mykhailo, Shevchenko Oleksii, 2024

that allow building two- or three-dimensional models of geofiltration processes: Visual Modflow, PMWIN, FREEWAT, Feflow, AquaveoGMS and others (Groundwater Modelling Syst., 2000; Harbaugh, 2005; The Official U.S.G.S MODFLOW, 2012). The scope of geofiltration calculations is extremely wide – the assessment of groundwater reserves, their balance characteristics, protection of areas from flooding, determination of water inflows, groundwater velocity, head gradients, distribution of groundwater pollution, forecasting the impact on the hydrogeological status and more.

At present, numerical simulation of geofiltration is mainly used (Shestopalov et al., 2001; Bugai et al., 2018, 2019). It provides a grid breakdown of the filtration area and is based

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (1)$$

where: K_{xx} , K_{yy} and K_{zz} – values of the filtration coefficient along the coordinate axes x , y , z (L/t); h is the head (L); W is the volumetric flow per unit volume representing water sources and/or effluents, with $W < 0.0$ for leakage from the groundwater system and $W > 0.0$ for the flow into the system ($1/t$); S_s is the specific capacity of the porous medium ($1/t$); t is the time (t).

Equation (1) describes non-steady-state filtration in heterogeneous and anisotropic media. Assumptions and simplifications are made for specific natural conditions that do not contradict the given equation.

The particle tracking algorithm used in the model, which we built using the MODPATH module, can be implemented for both stationary and transient flow fields. For simplicity, the algorithm is first described for a stationary flow and then extended to transient flow systems. The partial equation describing the conservation of mass in a stationary three-dimensional system of groundwater flows can be expressed as:

$$\frac{\partial}{\partial x} (nv_x) + \frac{\partial}{\partial y} (nv_y) + \frac{\partial}{\partial z} (nv_z) = W, \quad (2)$$

where v_x , v_y and v_z are the main components of the mean linear vector of groundwater velocity; n – porosity; W is the volume of water generated or consumed by internal sources and effluents per unit volume of aquifer (Pollock, 2012).

The finite-difference approximation of equation (2) can be considered as the equation of mass balance for a cell of a finite size grid with a volumetric aquifer, considering water coming in and out of the cell and for water produced or consumed inside the grid cell.

Methods

Natural and man-made conditions on the territory of 20 km of the Exclusion Zone.

Studies of the engineering-geological and geological-hydrogeological conditions of the area around the Chornobyl NPP have been conducted since 1973. The depth of the research is due to the complexity of the construction structures that were designed in the territory adjacent to the Chornobyl NPP. The results of this work are numerous reports, maps, geological sections of drilled wells. After the 1986 accident, radio-hydroecological monitoring of radioactive contamination of surface and underground waters is carried out on the territory of the Chornobyl Exclusion Zone. Since 1996, the Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine has been conducting radio-hydroecological monitoring, hydrogeological observations, and field experiments at the Chornobyl NPP industrial site and around the "Shelter" – Object.

These experiments are taking place in the local and 10-kilometer zone today. Thus, the entire long-accumulated geodatabase is in the reports, maps, sections, and data of

on the finite-difference method of solving differential equations. In this case, partial derivatives are replaced by finite increments, and the differential equation itself is reduced to a system of algebraic equations. These equations include such basic hydrodynamic parameters as heads and filtration coefficients, several equations are equal to the number of blocks of grid breakdown. Thus, numerical simulation is to solve the filtration equations on a computer, and the boundary conditions and structure of the filtration field must be determined.

For the joint description of headless and head filtration, the well-known differential equation in partial derivatives is used (*The Official U.S.G.S MODFLOW, 2012*):

hydrogeological, hydrogeochemical, and radiochemical regime observations, which are concentrated in electronic resources. It is being successfully used to create a hydrogeological model in 20 km of the Exclusion Zone. Data from 340 exploration and observation wells drilled were used during the entire period of research in the area to construct the roof surfaces, the soles of the Kyiv marl and the soles of the aquifer of the Buchak horizon. For example, in work (Sato, 2022), 12 wells with a depth of 35 m, three wells at 10 m and two at 4 m were used for hydrogeological modeling.

The model area was selected between the rivers Pripyat and Uzh (fig. 1).

These rivers and the cooling pond, lake Azbuchyn, Semikhody, and Pripyatsky Zaton are defined in the model as boundary conditions of the first order. Apart from Pripyat and Uzh, rivers such as Sakhan, Ilya, Maryanivka, and Hlynysia have a natural load on the territory. Converted into drainage canals in the floodplain of the Uzh and Sakhan rivers, as objects of man-caused load, belong to the boundary conditions of the third order. Small rivers and canals are set in the filtration model considering the water level, actual size and conductivity of their bottom sediments.

The Chornobyl nuclear power plant, the objects which were built after the accident, water management facilities: wells of the Pripyat water intake, groundwater drainage, cooling pond with drainage channels, household filtration fields ChNPP effluents are included in the objects of man-caused load. New man-made conditions that emerged after the 1986 Chornobyl accident include radionuclide contamination of the earth's surface, temporary localization of radioactive waste, and long-term radioactive waste disposal site "Pidlisny". In 1986, to prevent the spread of radionuclides with groundwater, a "wall in the ground" was created to the east of the Chornobyl nuclear power plant. The wall in the vertical plane covers the aquifer at its full thickness to a depth of 35–40 meters to the water-resistant layer representing the Kyiv formation marl. The wall is 0.6 m wide and filled with clay material (Comprehensive Assessment, 2020).

The boundaries separating the fluvio-glacial from alluvial deposits were obtained from a digital terrain model (DEM) raster map from a satellite of the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) with a resolution of 40 m.

Relief marks in the floodplains of the Pripyat, Uzh, and Sakhan rivers, and on the first floodplain terrace and in the floodplain range from 100 to 116 m (Baltic altitude system), relief marks on fluvio-glacial sediments reach values of 162 m. According to research (Panasiuk, 2014), the filtration coefficient on alluvial deposits is 30 m/day, and on fluvio-glacial deposits – 12 m/day. The filtration model consists of three layers of geological sediments (fig. 2).

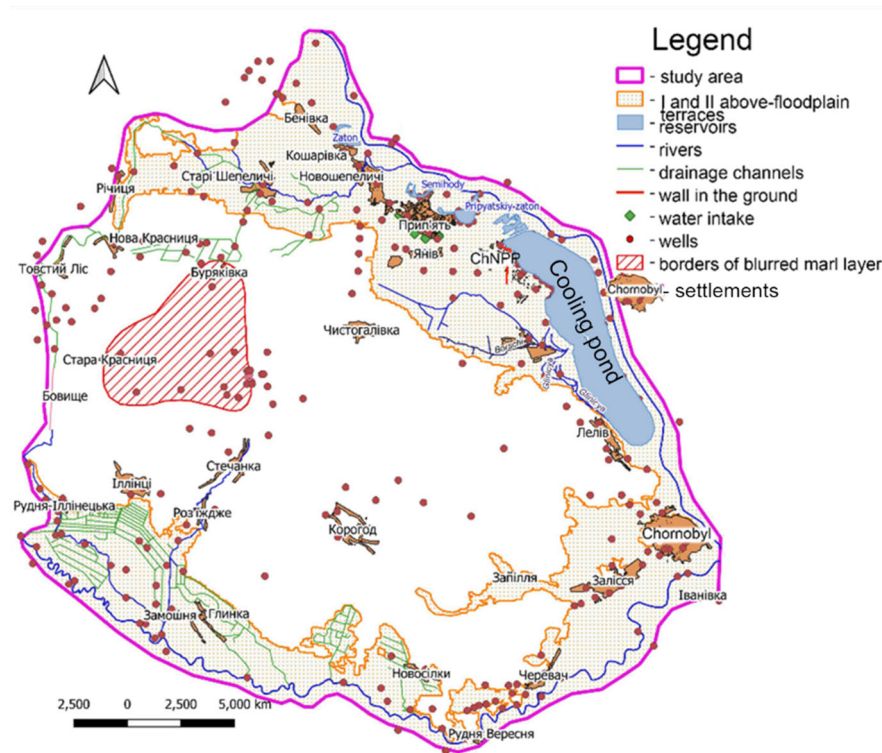


Fig. 1. Natural and man-made conditions of the district

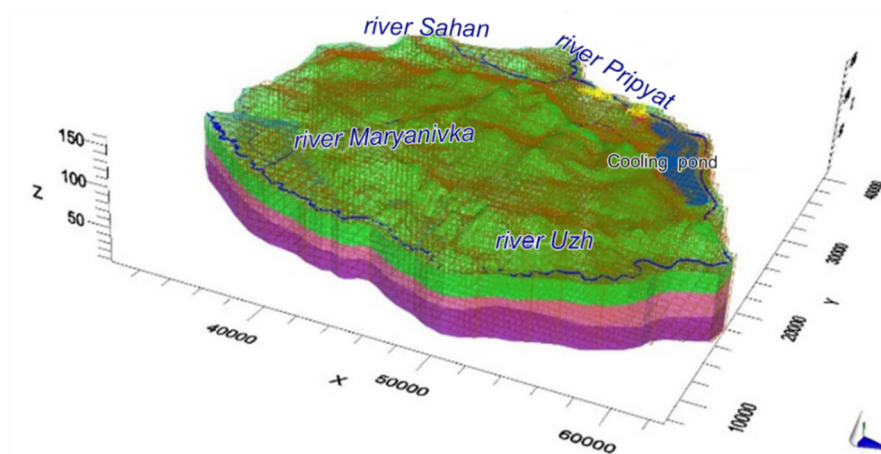


Fig. 2. Scheme of a three-dimensional filtering model

There are two aquifers – the upper headless Quaternary sediment and the lower head Buchak horizon with a filtration coefficient of 8 m/day, separated by a weakly permeable ($k = 0.0003$ m/day) layer of Kyiv marl. However, in the area of the settlements of Stara Krasnytsia and Buryakivka, the layer of marl clays is blurred and, in this area, two aquifers are interconnected (Scheme of water protection measures, 1993). In lithological terms, the first aquifer consists mainly of sand. Sandstones and loams are found in the form of lenses of small areas and power, which do not impede the movement of groundwater on a regional basis. Accordingly, the first aquifer behaves as a single groundwater reservoir. For the second aquifer in the model, the groundwater head was introduced as the boundary conditions of the first order in the form of isopies with a step of 5 m.

The horizontal surfaces of the model area were divided by a grid into rows and columns, vertically – by the thickness of the geological layers. The calculation of groundwater movement in the model has been performed separately for

each unit. This principle of replacing a continuous domain with a discrete one is the basis for the numerical solution of differential filtration equations.

The "wall in the ground" is made of clay and considered in the model by changing the filtration coefficient in the cells of the calculation grid through which it passes.

The calculation of the infiltration recharge of the pressureless aquifer was performed based on the results of observations of the groundwater regime in the Chornobyl region. Infiltration data are obtained by simulation in the filter fields – according to water supply data.

The conformity of the filtration model was achieved by solving the problem, which reproduces the existing hydrogeological conditions in the study area. In the process of analysis of the obtained solution, the filtration coefficient, conductivity of bottom sediments of small rivers, and infiltration recharge were adjusted. As a result, the correlation coefficient between the data obtained in observation wells and those calculated using a mathematical geofiltration model is 0.85 (fig. 3).

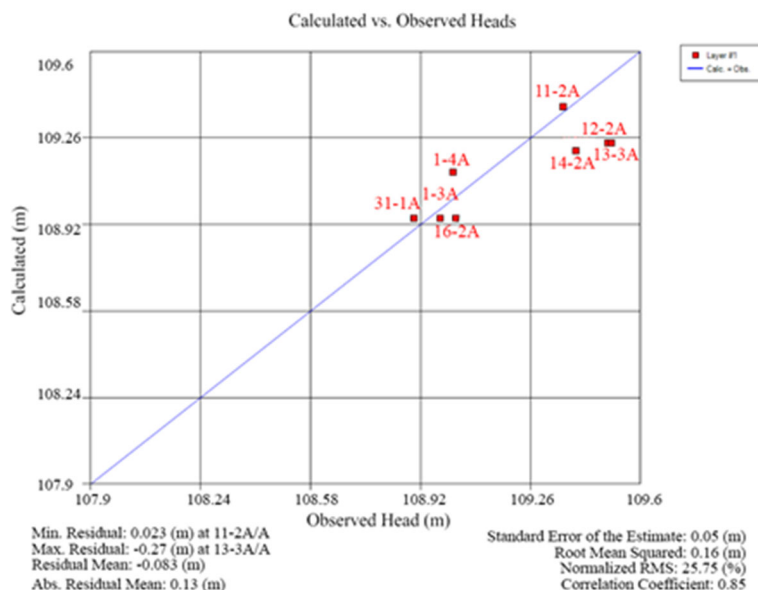


Fig. 3. Correlation of RGV data from observation wells and calculated using the model

Results

Distribution of heads and levels of groundwater, hydroisogypsum and the direction of vectors of the velocity of groundwater flow, was obtained by calculation on the model shown in figure 4.

Figure 4 clearly shows that in the area with the highest groundwater levels on fluvioglacial sediments, the groundwater flow velocity is the lowest (due to a smaller flow gradient). Naturally, in the alluvial deposits of the floodplains of the Pripjat, Uzh and Sakhan rivers, the groundwater flow rate is much higher, especially in the area of residual lakes in the area of the former cooling pond. Naturally, in the alluvial deposits of the floodplains of the Pripjat, Uzh and

Sakhan rivers, the groundwater flow rate is much higher, especially in the area of residual lakes in the area of the former cooling pond.

According to the calculations of MODPATH / MODPATH3DU, using equation (2) simulated the flow path and time of a conservative migrant passage or a conservative component of a pollutant during its convective transfer with groundwater from radiation-hazardous objects: PTLRW, Radioactive waste disposal site "Buryakivka", Central storage of spent nuclear fuel and NBK-OU Complex (fig. 5). Tracking pathways are used to predict the location of groundwater flow and the duration of their achievement if they start from a known place at a certain time.

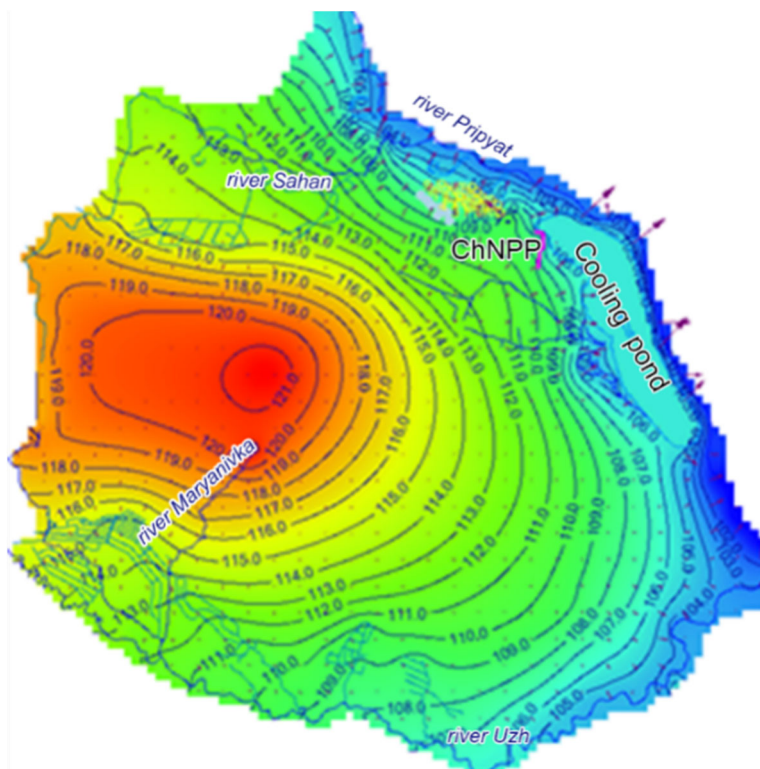


Fig. 4. Water table-contour map

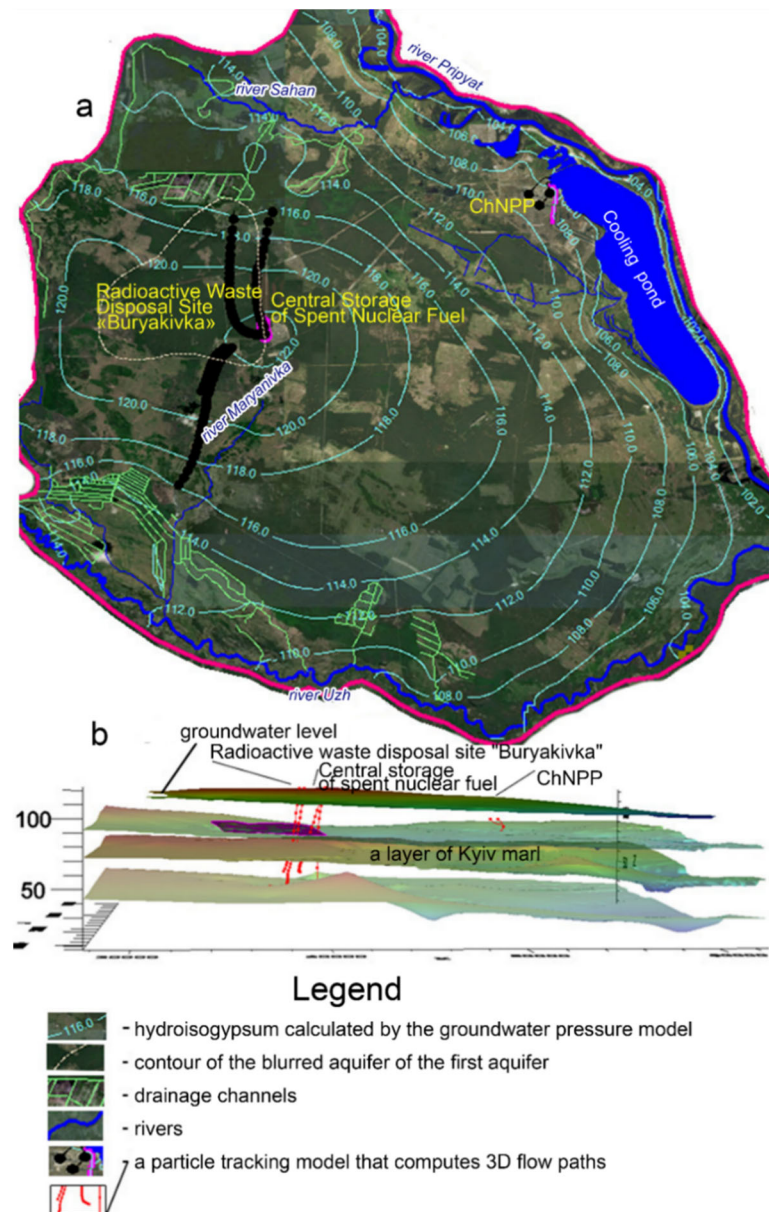


Fig. 5. View of the flow paths of groundwater particles in 2-dimensional (a) and 3-dimensional (b) images

Figure 5a shows the vector of the direction of movement of groundwater particles. The markers on the lines correspond to 10 years. In the Chornobyl area, groundwater is discharged into the residual lakes in the area of the former cooling pond in 10–20 years from the points planned by us. In the area of the Central storage of spent nuclear fuel and the Radioactive waste disposal site (RWDS) "Buryakivka" (Shabalin, 2023), groundwater moves in opposite directions and reaches the floodplains of the Sakhan and Uzh rivers in 400–450 years, respectively. Under natural conditions, as mentioned above, CSF and RWDS "Buryakivka" are located in the area where the layer Kyiv marl blurred. Figure 5 b in the three-dimensional image shows the trajectory of the movement of particles from the groundwater of the territories of the Central storage of spent nuclear fuel and the RWDS "Buryakivka" in 70–90 years reaches the Buchak aquifer. From the territory of the Chornobyl NPP, the groundwater of the Quaternary aquifer is not filtered through the Kyiv marl layer but is discharged into the nearest water body.

This geofiltration model was used to perform work on "Scientific and engineering support of drilling and installation

of observation wells of radio-hydro ecological monitoring", which was used to investigate how the level of groundwater will change with the destruction of the "wall in the ground" and under conditions when the water in the cooling pond dries to 103.5. This had to be done to check whether the new wells would fail if the hydrogeological conditions changed.

Figure 6 shows four variants of simulated groundwater levels at the Chornobyl industrial site under different hydrogeological conditions. The first figure (a) shows the groundwater level model, which had been built according to data as of 04.10.2017. The marks of the water surface in the cooling pond were 105.7 m. The filtration coefficient of the wall in the ground is $1E-05$ m/day.

The groundwater level in the area where the new wells were drilled under current hydrogeological conditions according to the model is approximately 108.8 m. According to the model, the groundwater level in the territory where new wells were drilled under current hydrogeological conditions is approximately 108.8 m. In a modeled variant without the wall, it will decrease to the level of 107.5 m, which is 1.3 m lower (fig. 6b). When draining the cooling

pond to the level of 103.5 m with a "wall in the ground" (fig. 6c), the calculated groundwater level in the model will be approximately 108.25 m – a decrease of only 0.5 m. In the conditions of the destroyed wall and the drained cooling pond to 103.5 m, the groundwater level will decrease to 106 m, which is 2.8 m lower than the groundwater level in the current state. The changes associated with the last two options lead to an improvement in the radiological state of groundwater due to an increase in the thickness of the aeration zone and its sorption capacity, and an acceleration of self-cleaning due to an increase of the flow gradient. At the same time, the unloading of contaminated groundwater will not take place in the Pripjat River, but in the isolated residual lakes of the former cooling pond.

The work on "Scientific and engineering support of drilling and installation of observation wells of radio-hydro-ecological monitoring" also included drilling and equipment of shallow wells for the study of the upper layer of the aquifer. According to the simulation results, the range of filter installation marks is determined and it is 104–106 m.

Impact of global climate warming. The impact of global warming was modeled by a decrease in the aquifer infiltration recharge.

According to the Chornobyl meteorological station data, a decrease in the amount of precipitation per year is observed (fig. 7).

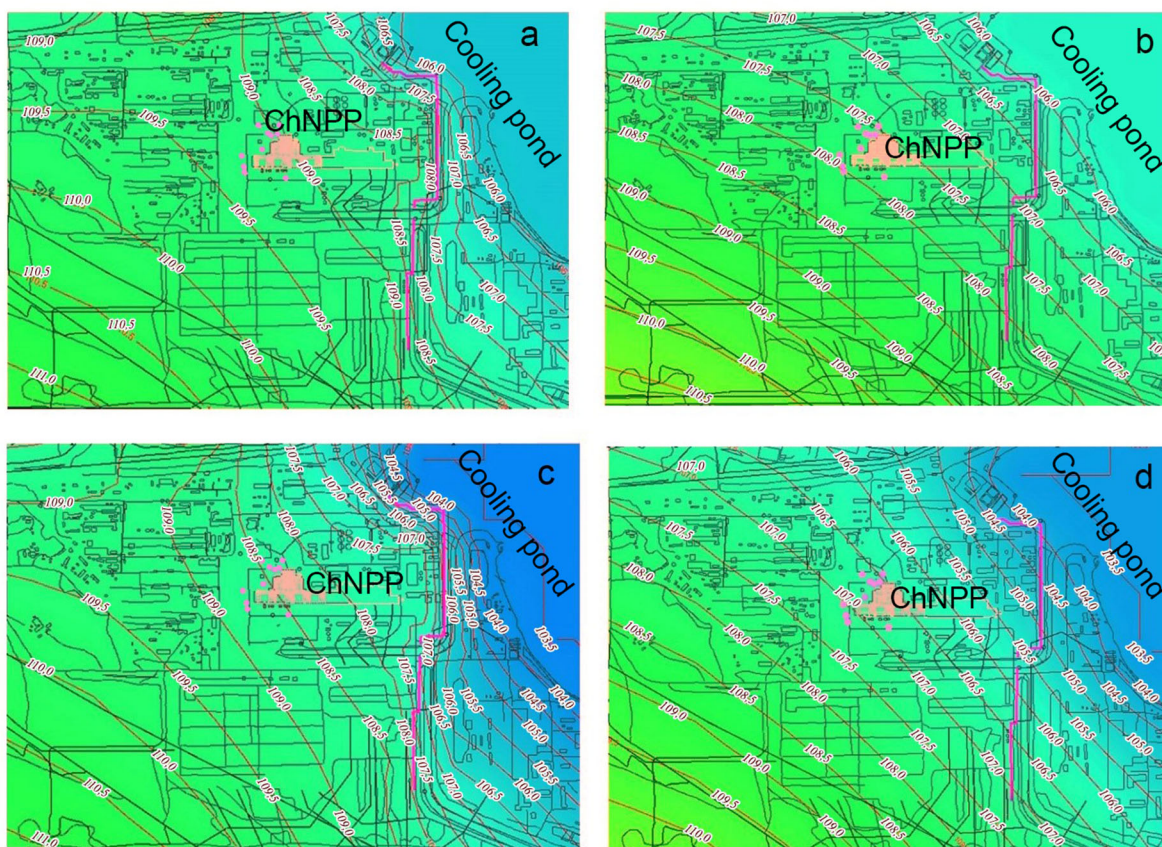


Fig. 6. The result of modeling the groundwater level in the area of the Chornobyl industrial site with changes in hydrogeological conditions, namely with the "wall in the ground" and the level of the cooling pond as of 04.10.2017 - 105.7 m (a); and without a wall (b); levels of groundwater with a "wall in the ground" and drainage of the cooling pond to the mark of 103.5 (c); without a wall and when draining the cooling pond to the mark of 103.5 (d)

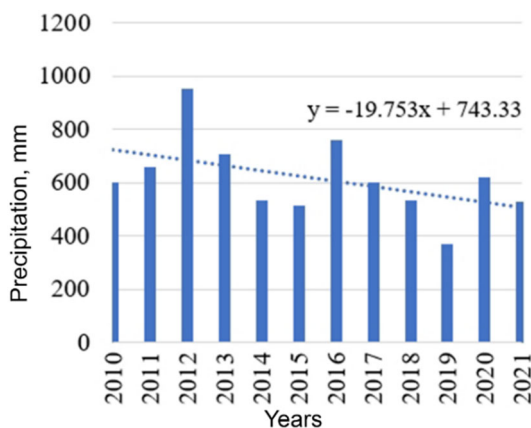


Fig. 7. The schedule of changes in the amount of precipitation by year

The precipitation nature has also changed – long-term precipitation during the growing season has changed to short-term showers that do not have time to moisten the aeration zone and reach the aquifer. The increase in temperature (Martazinova et al., 2022) has a very significant effect on aquifer nutrition along with the decrease in the amount of precipitation.

Average seasonal and average annual values of air temperature increased almost constantly with intensity from

0.3 (until 2011) to 0.45–0.6°C/10 years (Osadchyi, Shevchenko, & Krasovs'ka, 2021). It leads to intensive evaporation of groundwater, shallowing of small rivers and the occurrence of fire-hazardous situations with a decrease in the amount of precipitation and its nature.

An example of a modelled situation of a reduction in the groundwater level due to global warming is shown in figure 8.

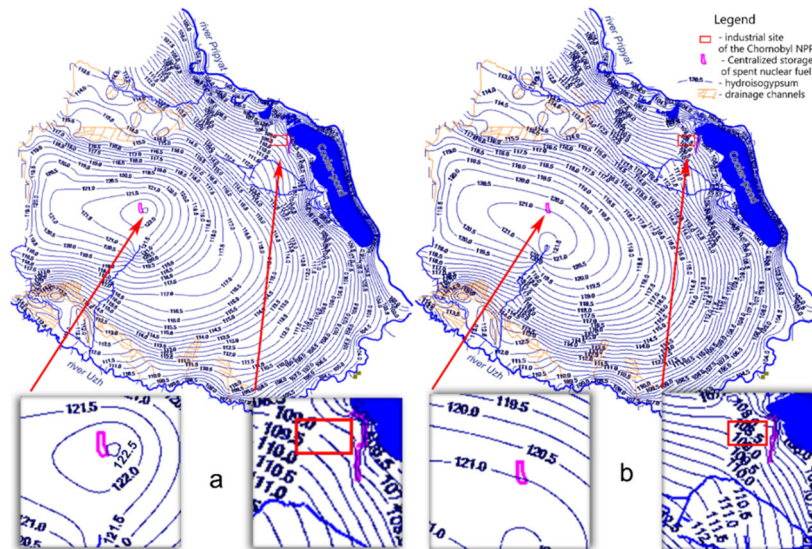


Fig. 8. Comparison of predicted groundwater levels at multi-year average values of the amount of infiltration nutrition of the Quaternary aquifer (a) and when it is reduced to 25–30 % (b)

Therefore, with average multi-year values of infiltration recharge, the maximum absolute mark (Baltic system of elevations) of the groundwater level on the territory of the Centralized Storage of Spent Nuclear Fuel is 122.5 m, and on the ChNPP industrial site – 108.5–109.5 m. When the infiltration recharge is reduced to 25–30 %, the groundwater level on the territory of the Centralized storage of spent nuclear fuel will decrease by 1.5–2 m, and on the site of the ChNPP, the groundwater level will reduce by 0.5 m. The results of modeling changes in radio-hydroecological conditions under the influence of global warming should be taken into account when planning the construction of a network of observation wells in radiation-hazardous objects of the Exclusion Zone.

The hydrogeological model made it possible to expand the possibilities of hydrogeological modeling and brought us as close as possible to the creation of perhaps the first hybrid hydrogeological-climatic model in Ukraine. The evolution of the model can be seen in the simulation of the hydrogeological situation based on pre-calculated climate scenarios with its filling with quantitative values of indicators reflecting modern climate changes (solar albedo, maximum and minimum daily air temperature, wind direction and speed and associated evaporation from the soil surface, etc.). Based on the presented hydrogeological model, a permanent migration model of convective transfer and hydrodynamic dispersion will be created, which will provide real information about the rates and directions of the spread of radionuclides in the underground environment after the descent of the cooling pond, and will also allow obtaining forecasts of changes in the radiohydrogeological situation under the influence of construction, operation or removal from the operation of radiation-hazardous objects against the background of the influence of climate change.

Discussion and conclusions

For the first time, a continuously operating hydrogeological model with high spatial discreteness has been built for the Uzh-Prypyatinterriver thanks to the use of data from 340 exploration and observation wells, which takes into account the fundamental change in the hydrogeological situation (levels, flows and directions of flows) after the descent of the Chornobyl NPP cooling pond. For the first time, the boundary separating fluvioglacial and alluvial deposits is displayed with high accuracy in the model, the boundaries of the hydrogeological "window" between the first and second aquifers, as well as of the "wall in the ground" that remained after the liquidation works in 1986; the distribution of groundwater heads on the Chornobyl nuclear power plant site, the hydrodynamic interaction between aquifers located above each other according to the data of bush wells drilled in 2019–2020 were taken into account. In addition to the data obtained by drilling wells, for the first time when creating the model, the results of deciphering the digital model map were used for relief from a satellite image. Thanks to forecast constructions that take into account the most likely scenario of climatic changes with a decrease in infiltration nutrition, the magnitude of the reduction of GWT by area was calculated.

The main scientific result is the heads distribution field obtained according to the third, most probable option (leaving the wall in the ground with a gradual decrease of the GWT due to a decrease in the level in the cooling pond to the mark of 103.5 m), which will ensure an improvement in the radiological state of groundwater due to an increase in the thickness of the zone aeration and its sorbent capacity and acceleration of self-cleaning due to the growth of flow gradients. At the same time, the unloading of contaminated groundwater will not take place in the Pripjat River, but in the isolated residual lakes of the former cooling pond. It will

take up to 20 years for groundwater to reach the lakes from ChNPP industrial site. The time of migration of conservative tracers from other most dangerous areas of radioactive waste localization was also established.

Thus, for the first time, after the lowering of the cooling pond, the actual distribution of groundwater pressures was obtained, zones of vulnerability to radioactive contamination of groundwater and underground waters of the second aquifer from the surface in the sediments of the Buchak series were identified, and the geological-hydrogeological basis for the creation of a permanent migration of radionuclides model was laid.

Authors' contribution: Mykola Panasiuk – conceptualization, data provision, correction and improvement of the model, writing; Natalia Sosonna – hydrogeological simulation, data validation, formal analysis, preparation of illustrations, translation; Igor Kovalenko – hydrogeological simulation, writing (original draft), design of figures; Mykhailo Buzynnyi – radiological data, translation; Oleksii Shevchenko – review of publications, selection of scientific novelty, conclusions, revision and editing.

References

- Bugai, D. A., Dzhepo, S. P., Skalsky, & A. S. (1998). Forecasts of geomigration, risk assessments and principles of water protection activities in connection with radioactive contamination of groundwater in the Chernobyl exclusion zone. In O.V. Voytsekhovych (Ed.), *Radioecology of water objects in the zone of influence of the accident at the Chernobyl NPP. Vol. 2. Forecasts of water pollution, assessments of water use risks and effectiveness of water protection countermeasures for aquatic ecosystems in the zone of influence of the Chernobyl accident* (pp. 218–252). Kyiv [in Ukrainian].
- Bugai, D. A., Dzhepo, S. P., Skalsky, A. S. et al. (2001). Migration of strontium-90 into groundwater from buried radioactive waste "Red Forest". *Problems of the Chernobyl Exclusion Zone*, 7, 20–31 [in Russian].
- Bugai, D. et al. (2012). Radionuclide migration at experimental polygon at Red Forest waste site in Chernobyl zone Part 2: Hydrogeological characterization and groundwater transport modeling. *Appl. Geochem.*, 27(7), 1359–1374. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.028>
- Bugai, D. O., Dzhepo, S. P., Skalsky, O. S., Kubko, Y. I., & Saprykin, V. Yu. (2018). Hydrogeological monitoring and mathematical modeling of radioactive contamination of groundwater in the Chernobyl Exclusion Zone and at the uranium facilities of the former Prydniprovskogo chemical plant (Kamyanske). *Geol. Journal*, 4 (365), 47–57 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2018.4.148466>
- Bugai, D., Dubas, V., Dyachenko, T. et al. (2019). Environmental impact assessment of the drowdown of the Chernobyl NPP Cooling Pond as a basis for its decommissioning and remediation. Vienna, IAEA. IAEA-TECDOC-1886.

Микола ПАНАСЮК¹, канд. техн. наук
ORCID ID: 0000-0003-3607-344X
e-mail: nipanasjuk53@gmail.com

Наталія СОСОННА¹, мол. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9913-3457
e-mail: natalyasosonnaya@gmail.com

Ігор КОВАЛЕНКО¹, асп., мол. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6793-595x
e-mail: maddoc01001@gmail.com

Михайло БУЗИННИЙ², д-р біол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0003-2812-573X
e-mail: michael.buzinnyi@gmail.com

Олексій ШЕВЧЕНКО³, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-5791-5354
e-mail: shevch62@gmail.com

¹Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Чорнобиль, Україна

²ДУ "Інститут громадського здоров'я О. М. Марзієва Національної академії медичних наук України"

³Український гідрометеорологічний інститут (УкрГМІ) ДСНС України та НАН України, Київ, Україна

ПОСТІЙНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ І МІГРАЦІЙНИХ УМОВ МЕЖИРІЧЧЯ ПРИП'ЯТЬ – УЖ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Вступ. За останні 8–10 років значно змінилися радіогідроекологічні та гідрогеологічні умови Чорнобильської зони відчуження. Під впливом виведення водоймища охолоджувача з експлуатації в масштабах регіону змінилися рівні, швидкість та напрямки руху підземних вод. За цей час були створені нові радіаційно небезпечні об'єкти: сховища відпрацьованого ядерного палива (СВЯП-2 та ЦСВЯП). Також посилюється вплив зміни клімату на режим водних об'єктів. Очевидно, що для вивчення впливу радіаційно небезпечних об'єктів на водне

Bukaty, M.B. (2008). Numerical methods of modeling the geomigration of radionuclides: Study guide. TPU Publishing House [in Russian].

Comprehensive assessment of cumulative environmental impacts of radiation-hazardous facilities in the Chernobyl Exclusion Zone. (2020). *Research report*. IPS NPP of NAS of Ukraine [in Ukrainian].

Groundwater modeling system. Version 3.1. Tutorial manual. (2000). In Environmental Modeling Research Laboratory of Brigham Young University. USA.

Harbaugh, W. A. (2005). MODFLOW-2005. The U.S. Geological Survey modular ground-water model—the ground-water flow process, U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A16. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF/TM6A16.pdf>. Accessed 3 Nov 2020

Martazanova, V. F., Horodetska, N. S., Rybchenko, L. S. et al. (2022). Features of the current state of the temperature-humidity regime of Ukraine since the beginning of the XXI century under the influence of changes in large-scale atmospheric circulation. *Meteorology. Hydrology. Environment monitoring*, 2, 22–34 [in Ukrainian].

Osadchyi, V., Shevchenko, O. & Krasovska, A. (2021). Formation features of river underground runoff under global warming conditions. *EGU General Assembly 2021*. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU21/EGU21-15311.html>

Panasiuk, M. (2014). Determination of the filtration coefficient of alluvial sands in the area of the ChNPP industrial site. *Safety Problems of Nuclear Power Plants and Chernobyl*, 23, 124–130 [in Russian].

Pollock, D. (2012). User Guide for MODPATH Version 6–A Particle-Tracking Model for MODFLOW. U.S. Geological Survey Techniques and Methods. <https://pubs.usgs.gov/tm/6a41/>

Sato, H. (2022). The Effect of Groundwater Bypass at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in 2014 by Detailed Facies Analysis and 3D Groundwater Simulation. In K. Nanba, A. Konoplev, T. Wada (Eds.), *Behavior of Radionuclides in the Environment III. Fukushima* (pp. 177–198). Springer.

Scheme of water protection measures for protection against radiation pollution of surface and underground waters in the ChNPP exclusion zone/volume II of the report: Assessment of the state of the geological environment and forecasts of radiation pollution. (1993).

Shabalin, B. H. (2023). Modeling of radionuclide geomigration from localized sources of pollution. In O.L. Shevchenko, V.V. Dolin (Eds.), *Radiohydrogeochemistry of catchment areas of the Chernobyl Exclusion Zone* (pp. 33–45). Naukova dumka [in Ukrainian]

Shestopalov, V. M., Lya'ko, V. Y., Sytnikov, A. B. et al. (2001). *Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster*. In 2 parts. Institute of Geol. Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine [in Russian].

Smith, L., & Gaganis, P. (1998). Strontium-90 migration to water wells at the Chernobyl nuclear power plant: Re-evaluation of a decision model. *Environ. Eng. Geosci.*, 4(2), 161–174.

The Official U.S.G.S MODFLOW (A Modular Tree Dimensional Finite Difference Groundwater Flow Model). (2012). In Waterloo Hydrogeologic. <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF/TM6-A16ch2.pdf>

Отримано редакцію журналу / Received: 17.10.23

Прорецензовано / Revised: 24.01.23

Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

середовище зони відчуження, прогнозування змін гідрогеологічних умов під впливом змін клімату та техногенних навантажень необхідно створити оновлену модель фільтраційно-міграційних умов з можливістю її подальшого коригування та вдосконалення.

Методи. У процесі створення і розробки постійно діючої математичної моделі на базі методу скінчених різниць розглядалися геологічні та гідрогеологічні умови району досліджень, проводились з використанням ГІС-технологій просторові побудови для візуалізації геологічної будови, складено фільтраційну схему для обчислювальних операцій. Для побудови поверхонь геологічних горизонтів використовувалась програма QGIS, для розробки фільтраційної моделі – програма Visual MODFLOW.

Результати. Побудовано модель фільтраційних та міграційних умов межиріччя Прип'ять – Уж Чорнобильської зони відчуження. Отримано розподіл рівнів ґрунтових вод та напорів у бучацькому водоносному горизонті. Виконано прогнози шляхів, напрямків та часових меж поширення забруднювачів з підземними водами від радіаційно-небезпечних об'єктів, а також прогнози впливу змін граничних умов водоносного горизонту на гідродинамічні параметри ґрунтових вод для обґрунтування проєктних рішень із вдосконалення мережі спостережних свердловин та визначення умов підтоплення проммайданчика ЧАЕС. Здійснено прогнози впливу глобального потепління на режим підземних вод.

Висновки. Прогнозне поле розподілу напорів демонструє можливість покращення радіологічного стану ґрунтових вод внаслідок: збільшення товщини зони аерації та її сорбційної смності, прискорення самоочищення завдяки зростанню градієнтів підземного потоку. Важливо, що розвантаження забруднених підземних вод відбуватиметься не в річку Прип'ять, а в ізольовані залишкові озера колишнього ставка-охолоджувача. Для того щоб підземні води потрапляли до озер з проммайданчика ЧАЕС, знадобиться близько 20 років.

Ключові слова: геофільтраційна модель, скінченно-різницевий метод, чисельне моделювання, рівень ґрунтових вод, коефіцієнт фільтрації, Чорнобильська зона відчуження.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 528.8; 004.932

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.104.15>

Roman OKHRIMCHUK¹, PhD Student
ORCID ID: 0009-0009-4910-412X
e-mail: romanokhrimchuk@gmail.com

Vsevolod DEMIDOV¹, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0003-9472-6530
e-mail: demidov@knu.ua

Kateryna SLIUSAR¹, Master Student
ORCID ID: 0009-0001-2151-6562
e-mail: katyabru31@gmail.com

Vladyslav LUKOMSKYI¹, PhD student
ORCID ID: 0000-0003-2282-3254
e-mail: lukoma770@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

STUDY ON EXOGENOUS PROCESSES ALONG THE WESTERN COAST OF THE CRIMEAN PENINSULA USING DEEP LEARNING METHODS

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. С.А. Вижвою)

Background. Monitoring changes in coastline contours is an actual topic in the field of environmental, geological and information research. However, tasks of this kind are complex and require using modern methods of data processing and analysis, including Earth remote sensing data. One of the modern approaches to solving this class of problems is using machine learning methods, which is the focus of the research in this article. The object of the authors' research is the western coast of the Crimean Peninsula, the study of which by traditional methods has become impossible due to the temporary occupation of the Crimean Peninsula since 2014. In the last decade, the Crimean coastline could have undergone significant changes as a result of anthropogenic activities (including those related to military operations) and landslide-abrasive processes. In this study, the authors limit the study to changes in the coastline of the western part of the Crimean Peninsula over the last decade.

Methods. Authors used CNN models (U-Net model) to effectively recognize the coastline and its boundaries in satellite images without the need for manual vectorization.

Results. The research involved developing Python code to automatically generate reports including network accuracy (0.95) and loss function (0.19), facilitating the evaluation of different approaches and methods. Additionally, the study created scripts for using the trained network in the task of semantic segmentation and translating the result of the segmentation model into a vectorized result of the coastline contours of the Crimean Peninsula, which was represented as a probability raster.

Conclusions. The use of this approach is useful for monitoring changes in the coastline of rivers, seas and lakes throughout Ukraine.

Keywords: Coastline, Convolutional Neural Network, U-Net model, Crimean Peninsula.

Background

Due to the temporary occupation of the Crimean Peninsula since 2014, traditional instrumental studies for monitoring changes in its coastline have become impossible to carry out. In the last decade, the Crimean coastlines could have gone through significant changes as a result of anthropogenic activity and landslide-abrasive processes. Traditional coastline mapping methods are relatively expensive, time-consuming, require manpower, and contain a lot of uncertainties due to the unique geometric and spectral structures of coasts (Ge, Sun, & Liu, 2014). It's important to mention that past instrumental studies were limited in scope, and carried out to a minimal extent due to cost constraints. The historical data collected is also discontinuous, with observation points placed unevenly along the coast and not covering the entire coastline.

This has prompted the need to find alternative methods of monitoring these changes. Remote sensing data and satellite images have become a valuable resource in this regard, as they offer a more comprehensive view of the coastal region. However, interpreting the vast amounts of data gathered from remote sensing can be challenging. This is where machine learning techniques and convolutional neural networks (CNNs) come in handy, as they can analyze this data more effectively and efficiently, making it possible to monitor changes in the coastline. The aim of this study is to use machine learning algorithms to monitor changes in

the coastline of the western part of the Crimean Peninsula over the past decade. The algorithms will not only help measure the intensity of erosion and accumulation processes but also make quantitative evaluations of the areas that have increased or decreased along the coast.

The use of machine learning algorithms to monitor changes in the coastline contours of the western part of the Crimean Peninsula is a challenging task that requires expertise in many areas, including geology and machine learning. The availability of satellite imagery from the last 10 years provides the opportunity to assess the impact of changes on the study area. This information is critical for managing coastal resources, protecting the coastal environment, and planning for sustainable coastal development. The use of machine learning methods will enable automated recognition of the coastline and its boundaries on satellite images, without the need for manual vectorization. The development of such an approach would definitely be useful for use in the future to monitor changes in coastlines along rivers, seas, and around lakes throughout the territory of Ukraine.

Historically, monitoring the changes in the coastline of the Crimean Peninsula was performed through limited field surveys using traditional instruments. However, the cost of these surveys meant that the data collected was irregular and incomplete, with observation points located unevenly along the coast, resulting in gaps in coverage of the entire

© Okhrimchuk Roman, Demidov Vsevolod, Sliusar Kateryna, Lukomskyi Vladyslav, 2024

coastline (Cherkez et al., 2012). In Kotolupova's study from 2014, the author looked at the effects of human activity and erosion from landslides on the changes in the Crimean coastline. The work highlights the fast-paced and understudied nature of erosion and destruction in the coastal zone and emphasizes the importance of systematic examination and management. The coast was divided into zones based on geomorphology and morphodynamics, revealing areas with a tendency towards erosion from landslides (Kotolupova, 2014). Thereby, the range of techniques for monitoring environmental changes has greatly increased, with a focus on using GIS/DSS technologies (Lialko et al., 2006; Bairak, & Mukha, 2010). The study explored the challenges in implementing monitoring methods in a GIS environment and proposed a method for identifying areas of shoreline erosion and evaluating the severity of erosion processes (Krasovskyi, & Petrosov, 2003).

Studies of changes in the coastline are presented in works (Starodubtsev, 2019; Tomchenko, Mazurkiewicz, & Malets, 2017), in these works Landsat 4, 5 and 8 satellite images were taken as a basis. The primary methodology used in these studies is manual vectorization of the coastline

boundaries, which is a labor-intensive process. The study of natural-anthropogenic transformations of the lake was conducted based on the use of Sentinel-1 (SAR) and Sentinel-2 satellite data, but the mapping of changes was still performed manually, making it an inefficient method if it is to be used as a universal tool for large areas (Martyniuk, & Tomchenko, 2021).

Investigation of the geological structure of the western coast of the Crimean Peninsula and underwater slopes of the Black Sea was also carried out as part of the study. The geological and engineering characteristics of the area are established based on the presence of different types of rocks with distinct geological and genetic origins (Boiko, & Koshliakov, 2015).

In order to better understand the potential for the development of abrasion and accumulation processes, a literature analysis was conducted on geological studies of the coastline of the western part of Crimea.

Based on the collected information, it was decided to divide the western coast into 5 sections that have similar geological structures and climatic factors which in turn determine their development in the future (fig. 1).

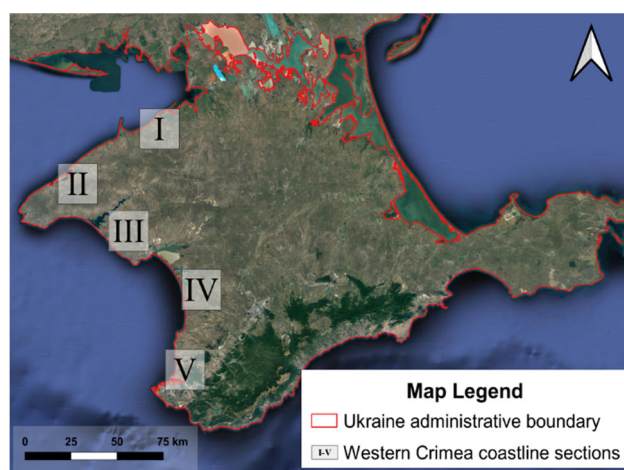


Fig. 1. Sections of the western coastline of Crimea

The northwestern section (I) extends from Perekop to Bakalska spit, composed of easily erodible clayey formations and forest-like marl with steep cliffs in the northwest part of Crimea and accumulative forms such as sandy dunes. This coast is characterized by the presence of migratory deposits and the most unstable coastal line for Crimea. According to previous research, the rate of change

of accumulative formations can reach several hundred meters per year, while the retreat of the coast can be up to several meters per year. (Horiachkyn, & Ivanov, 2010). The active process of coastal abrasion can be seen in the Bakal spit, based on a comparison of satellite images with a difference of 10 years (fig. 2).



Fig. 2. Coastline changes on the example of the Bakal spit:
a – for 2008; b – for 2018 (Google Earth service, 2023)

The coast of the Tarkhankut Peninsula (II) section extends from the Bakalska spit to Lake Donuzlav to the southwest. The cross-sections are represented by abrasive-accumulative shorelines with sandy loess deposits and sedimentary rocks-limestones. The main part of the cliff consists mostly of limestones, while the rest are clay cliffs with a height of up to 50 meters. Accumulative deposits are formed due to bottom abrasion. The beaches along the cliff are mostly narrow and consist of unsorted and unquenched material-limestone gravel, and sand with traces of shells. According to researchers (Horiachkyn, & Ivanov, 2010), a high rate of abrasion is observed on the clay cliff, which is about 1.0 m/year, while the rest of the cliff, which is composed of limestone sediments, has a low rate of abrasion.

The Western Crimea section (III) extends from the mouth of the Donuzlav to Yevpatoriya. The coast of this section is formed due to the accumulation of shore and sea floor abrasion products, and in some places, clay strata emerge on the sea floor. A strip of beach runs along the entire coast, gradually turning into sandy dunes, and sometimes into salt marshes. According to the research on this coastal area, it was shown that 75 % of the coast length is relatively stable, 9 % is increasing in the area, and 16 % is decreasing (Horiachkyn, & Ivanov, 2010). This is due to the fact that areas with retreating coasts are exposed to the sea, and the increase is on the advancing coast, so it was concluded that this is a natural process of shore leveling. The average rate of shore retreat is about 1 m/year (Horiachkyn, & Ivanov, 2010). The cause of beach shrinkage is related to natural activities (rising sea level, repeated cycles of storm winds from the south and south-west directions), as well as anthropocentric impact. Human activity has a significant impact, including constant sand extraction for construction purposes, the construction of coastal protection structures, and the discharge of pollutants into the sea.

The Yevpatoria section – Cape Lukull section (IV) has the same characteristics as the previously described one, specifically an accumulative coast formed by the accumulation of deposits as a result of coastal erosion.

Beginning from the village of Mykolayivka to the Lukull Cape, the height of the beach starts to increase. The coastal line is represented by even abrasion-collapse and abrasion-shift coasts with cliffs made of clayey sediments of the Quaternary period, represented by clays. Clay cliffs are easily subject to erosion, the speed of retreat of the clay cliff ranges from 0.1 to 1 m/year (Horiachkyn, & Ivanov, 2010).

The Cape Lukull-Sevastopol section (V) is represented by abrasion-slide and abrasion-collapse coasts, the cliff of which is composed of clay deposits from Quaternary siltstones and Neogene chalk formations. The coastal strip along the cliff is not wide and consists of sand and poorly sorted, weakly consolidated chalk. The rate of abrasion in this area varies from 0.1 to 1 m/year (Horiachkyn, & Ivanov, 2010).

The analysis of satellite images in the area of the Nimetska Balka revealed the marble and sand mining (fig. 3). The mining operations are carried out in the coastal zone, minerals are extracted in 4 horizons, the height of the ledges is about 5–6 meters, and the area of the deposit is about 8.17 hectares. The extraction activities began after the occupation of Crimea by the Russian Federation in August 2017. The development of the quarry leads to the degradation of the coastline near the town of Kacha. Also, according to the satellite imagery, the mining regulations that would have prevented the degradation of the coastal zone were not adhered to.

Based on the research conducted using satellite images, it can be concluded that the coastline of the western coast of Crimea has undergone significant changes since 2014. Among the main factors that have influenced its transformation are detrimental anthropogenic activities and poor monitoring to prevent negative processes in areas with potential risks. The methodology proposed in this paper is able to detect the difference in coastline changes over the past 10 years based on machine learning methods and historical satellite images. This, in turn, will provide information on its borders in the past and obtain the actual ones. A preliminary analysis based on satellite imagery determined that such research would be appropriate and useful.



Fig. 3. Satellite imagery of the quarry near the Nimetska Balka (Google Earth service, 2023)

Methods

The complex, multifaceted nature of coastal zone dynamics, combined with the recent increase in Big Data pertaining to coastal risk, has prompted studies investigating whether ML tools can improve our understanding of coastline position and coastal population dynamics

(Goldstein, Coco, & Plant, 2019). Shoreline detection is an example of an application of image-based edge- detection and is an established research area in computer vision (Arbelaez, Fowlkes, & Martin, 2007). Although computer vision research is effectively used to identify everyday objects, remote sensing images contain more spectral

bands, more noise, and a higher density of edges than natural images (Liu, & Jezek, 2004; Liu et al., 2019). The multidimensional nature of remote sensing imagery has generated interest in using ML tools to automatically identify coastlines from imagery.

Most ML-based automated shoreline detection like Support Vector Machines (SVM) and Random Forest (RF) methods are based on extracting waterlines from remote sensing imagery. SVMs yield promising results for feature classification and detection of remote sensing images even when trained on a small training dataset (Elgohary, Mubasher, & Salah, 2017). SVM are non-parametric and do not assume the training dataset is normally distributed. This is appropriate for satellite images, which typically contain high levels of noise (Maulik, & Chakroborty, 2017). Random Forests consist of an ensemble of decision trees that individually split the dataset multiple times into smaller sub-classes using threshold values. As a conclusion of successful results achieved in different problems, researchers used this method for coastline extraction and land use classification as well. RF can also perform analysis with many input predictors. This feature is advantageous when using multiple remote sensing data sets of various resolutions in different coastal areas. This algorithm was applied for extracted coastlines around Terkos Lake and on the coasts intersecting with the Black Sea by utilizing the Random Forests classifier over Landsat-8 medium-resolution satellite images (Bayram et al., 2017). Although the algorithm solves the problem of obtaining coastline contours for long areas, the output results contain a lot of noise, which is a significant disadvantage.

Previous studies have used RF and SVM to classify remote sensing images into land and water pixels and assign

the location of the waterline as the boundary between the two surface cover classes. Coastline extraction based on RF (Demir et al., 2017) obtained efficient results for both medium and high-resolution images for shoreline extraction studies. However, although a continuous waterline was identified, a large average error (>22 m) due to noise in the input image was recorded between the manually digitized shoreline and the RF-derived shoreline. On the other hand, the coastline was classified using Supported Vector Machines in the latest studies (Elnabwy et al., 2020). The detected shoreline by the proposed method was highly correlated with on-the-ground measurements. Elsewhere, heterogeneity in the spectral properties of water between images, caused by differences in atmospheric scattering, solar radiation incidence angle, and azimuth adversely affected SVM and RF classification performance (Rogers, 2020).

Such difficulties have led to increased attention to the use of Convolutional Neural Networks (CNNs) in shoreline detection (Rogers, 2020). CNNs were applied to remote sensing images for feature detection, edge extraction, and pixel-based classification. Convolutional Neural Networks have larger training requirements than SVMs and RFs, but their ability to derive semantic information via convolution provides promise in their being able to detect features in remote sensing imagery (Kattenborn et al., 2021).

The architecture of a Convolutional Neural Network (CNN) consists of an input layer, one or more hidden layers, and an output layer (fig. 4a). Each layer has a different number of nodes and the synapses between the nodes of different layers allow information to flow from one layer to the next (fig. 4b). The activation function, σ , enables the CNN to determine non-linear relationships between input and output variables (Rogers, 2020).



Fig. 4. Main components CNN:

a – The architecture of a very simple CNN contains an input layer (two nodes), a hidden layer (four nodes), and an output layer (one node); b – Outline of how the values of nodes in one layer are multiplied by their corresponding weight to derive the value of nodes in the next layer (σ – activation functions, a_j^i – data(images), w_j – weights) (Rogers, 2020)

During training, the weights between nodes are updated through feedforward and backpropagation. Input data is passed through the network, a prediction is made, and the difference between the prediction and observed output is used to update the weights through backpropagation. This cycle is repeated hundreds or thousands of times and is referred to as one epoch (Xie, & Tu, 2015). The combination of feedforward-backpropagation and convolution enables CNNs to detect features of interest in remote sensing images and to distinguish them from other features with similar spectral properties. This feature could be especially important in detecting edges in remote sensing which contain a high density of edges (Kokkinos, 2016).

CNN techniques have been successfully used to automatically extract the instantaneous water line from coastal remote sensing imagery. CNN's high performance is

due to the use of a sliding kernel, i.e., the simultaneous consideration of pixel value neighborhoods rather than pixel-by-pixel classification. This enables CNN to detect scale-invariant features, whereby features and their edges will be in the exact location, irrespective of the size of the kernel convolving over the image. Noise and speckles are only likely to be considered as potential features when using smaller kernels and so are discarded when larger kernels convolve over the image (Liu et al., 2019). Deeper CNNs, which convolve a wider range of kernel sizes on an image, outperform shallow CNNs because they can detect features at different scales (Hasan, Shafri, & Habshi, 2019). Although CNNs generally outperform SVMs and RFs in edge detection and classification tasks in remote sensing images, CNNs require large training datasets and are prone to overfitting when trained on small datasets (Rogers, 2020).

This paper aims to develop a reliable, versatile, and efficient tool for recognizing changes in the coast of Crimea along the coast, based on machine learning methods. This tool will be used to monitor coastline changes and provide valuable information for coastal management and decision-

making processes. The implementation of the goal is subdivided into 4 stages: data collection, development of convolutional neural network architecture, semantic segmentation of the coastline, and evaluation and reporting of our results (fig. 5).

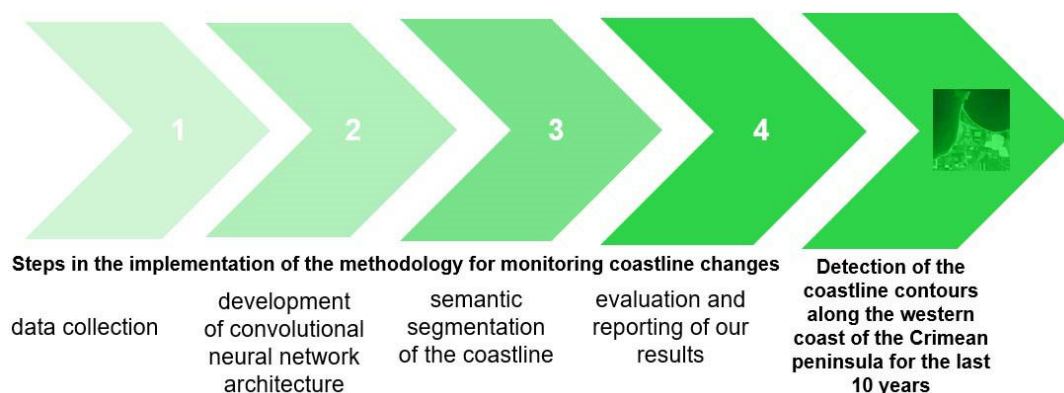


Fig. 5. Stages of technical implementation of the methodology for monitoring coastline changes

Remote sensing data can play a vital role in mapping the coastline and identifying changes over time. The use of satellite imagery provides a broader set of data compared to other forms of remote sensing data. During developing a reliable, universal, and effective tool for recognizing changes in the coastline along the western coast of Crimea, it is necessary to make an analysis to obtain information about available algorithms that could perform shoreline contour recognition (Okhrimchuk, Demidov, & Brudko, 2022).

Monitoring of changes in coastline contours along the coast of the western part of the Crimean Peninsula based on the use of machine learning methods is a complex task that requires a sufficient level of competence in many areas

of research, starting from the geological component and ending with machine learning methods. Implementation of such a non-trivial task required open data sources, as well as technologies available under a free license (Okhrimchuk, Demidov, & Brudko, 2022).

The data collection stage involves collecting satellite images of the western coast of the Crimean Peninsula over the past 10 years. At this stage of data preparation, it is necessary to develop functionality that will allow the processing of historical images from such products as Landsat-8, Sentinel-2, and PlanetScope. The PlanetScope with a spatial resolution of 3 m can be used as the main source of remote sensing data (fig. 6).



Date	08-09-2022	19-08-2022	28-07-2022
Product	Landsat-8	Sentinel-2	PlanetScope
Spatial resolution	30 m	10 m	3 m

Fig. 6. Comparison of spatial resolution of RGB channels of different products

The images should have medium or high spatial resolution images and temporal resolution to ensure accurate and reliable results. The option of creating a synthetic georaster that can integrate different products or their derivatives, as well as follow a specific channel sequence to more accurately represent the coastal topography will also be considered. This innovation has the potential to improve temporal resolution and reduce the impact of cloud cover in certain scenarios. Once you have a collection of images, you will need to annotate them to indicate the location of the coastline. This can be done manually or with the help of specialized software that can automatically detect and mark the coastline in the image. The annotated images should be saved in a format that is

compatible with the CNN framework you are using. To increase the size and diversity of the training set, data augmentation techniques can be applied. These techniques involve transforming the original images in various ways, such as rotating, flipping, scaling, and adding noise or distortions. By creating multiple variations of each image, the training set can be expanded, providing more data for CNN to learn from. It is important to note that the training set should be balanced, meaning it should have an equal representation of coastline and non-coastline images. This helps to prevent CNN from being biased towards one class and achieving a higher accuracy rate for that class. The quality and diversity of the training set play a critical role in the performance of CNN.

The next step is the development of a convolutional neural network architecture to solve the task of mapping the coastline.

Results

The main aim is to select and develop convolutional neural network (CNN) architectures capable of performing semantic segmentation of coastlines on satellite images. This is a specialized task for convolutional neural networks, and an adaptive mechanism is needed to extract informative features from the input data and generate semantically meaningful results. The semantic segmentation approach using U-Net is the most suitable mechanism for this task, as it allows distinguishing the most informative features and

generating results that can be interpreted. Thus, the main task is the selection and development of convolutional neural architecture networks (further in text "CNN") for the semantic segmentation of coastlines on satellite images. Segmentation of satellite images is a separate direction for convolutional neural networks. Therefore, it is advisable to involve some adaptive mechanism that can extract the most informative features from the set of input data and generate an interpretable semantically meaningful result on their basis. The most suitable mechanism is the Semantic Segmentation approach with U-Net (fig. 7) (Okhrimchuk, Tishaiev, Zatserkovnyi, & 2020).

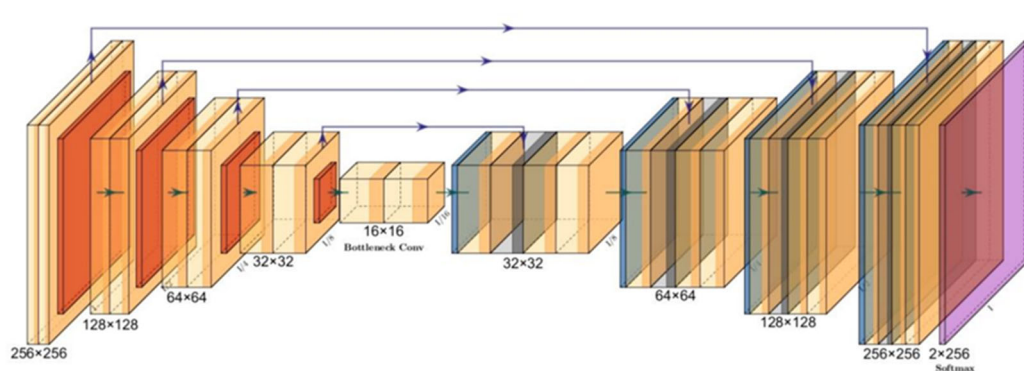


Fig. 7. Segmentation U-Net architecture. Here, l – the spatial size of the input image patch (Ronneberger et al., 2015)

The next step is to define and possibly create a CNN architecture for the semantic segmentation of coastlines on satellite images. Different neural network architectures will be implemented and tested to determine their effectiveness. CNNs are well suited for this task as they have proven to be effective in image classification and semantic segmentation tasks. A CNN should be designed and optimized for semantic coastline segmentation taking into account the specific characteristics of the data and the task. This may include customizing the network architecture, selecting appropriate activation functions, and modifying training parameters. Solving the semantic segmentation problem requires developing code in Python and supporting the computing infrastructure using the open-source library for high-performance computing TensorFlow. The semantic segmentation approach using U-Net can be successfully implemented using the TensorFlow library, which provides the ability to use pre-trained models and their architectures using special modules. The developed architectures can be used in full or only in the convolutional part, depending on the specific requirements of the task. During the contraction, the spatial information is reduced while feature information is increased. The expansive pathway combines the feature and spatial information through a sequence of up-convolutions and concatenations with high-resolution features from the contracting path (Okhrimchuk, Tishaiev, Zatserkovnyi, & 2020). Also, in the context of a U-Net model, the backbone typically denotes the initial layers of a pre-trained convolutional neural network utilized for feature extraction, which is then incorporated with the decoder section of the U-Net to enable image segmentation. The backbone generates a set of feature maps that form a prediction. Incorporating a backbone in a U-Net model involves selecting a pre-trained convolutional neural network such as VGG, ResNet, or EfficientNet as the backbone, extracting the final classification layers, and adding them to the decoder portion of the U-Net. The backbone enables high-level features that combine with the low-level features of the decoder section to

produce the final segmentation outcome. The pre-trained backbone can be fine-tuned using the specific dataset, or transfer learning can be applied to adapt it to a related task to enhance the performance of the U-Net model for the particular segmentation task. The previous study utilized a U-Net architecture with a ResNet34 backbone to develop a segmentation model for recognizing the contours of the coastline of the Crimean Peninsula on satellite images (Okhrimchuk, Demidov, & Brudko, 2022). The model was trained until a validation loss of 0.19 and a validation accuracy of 0.95 were achieved. The study also involved developing Python code to automatically generate reports that include information about network accuracy and loss functions, which facilitated the evaluation of different approaches and methods. Additionally, the study created scripts for using the trained network in the task of semantic segmentation and translating the result of the segmentation model into a vectorized result of the coastline contours of the Crimean Peninsula, which was represented as a probability raster (fig. 8). These findings demonstrate the effectiveness of using the U-Net architecture with a ResNet34 backbone in developing segmentation models for recognizing the contours of coastlines on satellite images.

After the CNN has been trained, the next stage is to use it for semantic segmentation of the target class, which involves generating a probability map of the coastline for each image. Post-processing of the probability raster is then necessary to remove noise and improve the quality of the result. This may include thresholding, smoothing, and morphological operations. Finally, the result should be vectorized to obtain the contours of the coastline. This will enable the recognition of the coastline along the western coast of the Crimean Peninsula over the past decade, providing valuable insights into coastal erosion and other geological changes in the region. The process of semantic segmentation and vectorization can be automated through the use of scripts and specialized software tools, allowing for the efficient and accurate analysis of large volumes of satellite imagery.

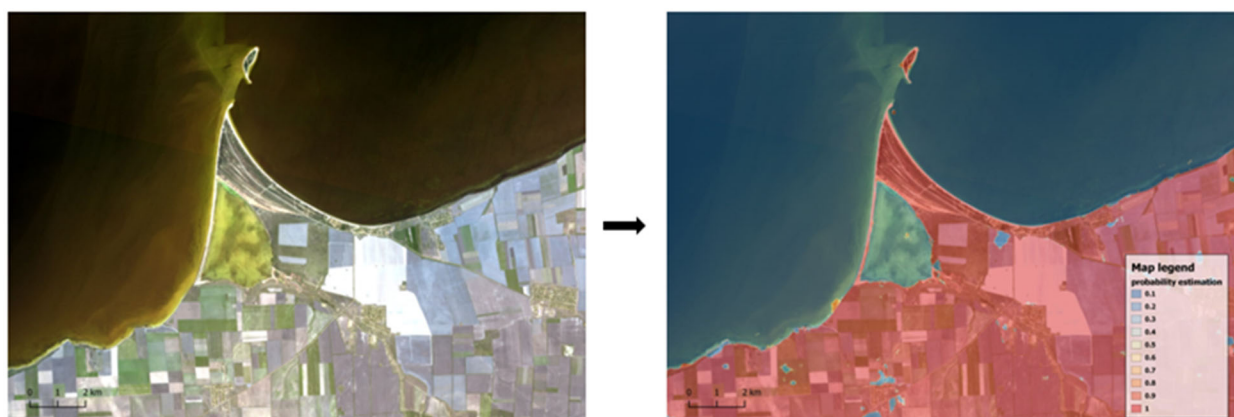


Fig. 8. The result of coastline detection using semantic segmentation, which is represented as a probability raster dated as of 01.07.2022

In the evaluation and reporting stage, the accuracy of the recognized coastline contours will be assessed by comparing them with actual changes in the coastline. The results will also be compared with existing methods for monitoring coastline changes to determine the advantages and disadvantages of the proposed approach. To prepare a comprehensive report on the research results and the developed tool, a detailed description of the methodology, the CNN architecture used, and the results of the semantic segmentation of the coastline will be included. Additionally, a discussion of the limitations and future work to improve the tool's reliability and efficiency will be provided, along with recommendations for practical use and further development. By conducting this comprehensive evaluation and reporting, the proposed approach's efficacy can be determined and refined for practical applications in monitoring coastline changes.

Discussion and conclusions

This paper aimed to monitor changes in the coastline of the western part of the Crimean Peninsula over the past decade using machine learning algorithms. Traditional methods of monitoring coastline changes have become difficult due to the temporary occupation of the peninsula and the cost constraints of past instrumental studies. Remote sensing data, specifically satellite imagery, was used to gather data, which provided a more comprehensive view of the coastal region. To analyze this data more effectively and efficiently, machine learning techniques and convolutional neural networks (CNNs) were used to recognize changes in the coastline contours on satellite images. The implementation of this tool involved data collection, the development of a convolutional neural network architecture, semantic segmentation of the coastline, and evaluation and reporting of the results. The U-Net architecture was selected and developed for the semantic segmentation of coastlines on satellite images, which was optimized for semantic coastline segmentation by customizing the network architecture, selecting appropriate activation functions, and modifying training parameters. The TensorFlow library was used to develop code and support the computing infrastructure, allowing for the successful implementation of the U-Net architecture. This tool has the potential to provide valuable information for coastal management and decision-making processes, and its development is an important step toward automated recognition of coastlines without the need for manual vectorization. The findings of this study will help in managing coastal resources, protecting the coastal environment, and planning for sustainable coastal development. The developed methodology has a potential application for

monitoring changes in coastlines along rivers, seas, and around lakes throughout the territory of Ukraine.

Authors' contribution: Roman Okhrimchuk – methodology, data validation; Vsevolod Demidov – conceptualization, methodology, review and editing; Kateryna Sliusar – data treating, formal analysis; Vladyslav Lukomskyi – formal analysis, writing.

References

- Arbelaez, P., Fowlkes, C., & Martin, M. (2007). The Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark. <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds/>
- Bairak, H. R., & Mukha, B. P. (2010). Dystantsiini doslidzhennia Zemli. Navch. posibnyk. Vydavn. tsentr LNU im. I. Franka [In Ukrainian].
- Bayram, B., Erdem, F., Akpinar, B., Ince, A.K., Bozkurt, S., Reis, H. C., & Seker, D. Z. (2017). The Efficiency of Random Forest Method for Shoreline Extraction from LANDSAT-8 and GOKTURK-2 Imageries. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(1), 141–145.
- Boiko, K. Ye., & Koshliakov, O. Ye. (2015). Quantitative Regional Landslide Hazard Prediction Using GIS within Southern Coast of Crimea. *Geoinformatika*, 3(55), 76–82 [in Ukrainian].
- Cherkez, Ye., Medinets, V., Pavlik, T., Shatalin, S., Konareva, O., & Medinets, S. (2021). Otsinka dynamiky berehovoï linii (proekt PONTOS). *Odeskyi natsionalnyi universytet imeni I.I. Mechnykova, Odesa*, 06.06.2021. [in Ukrainian]. https://pontos-eu.aau.am/wp-content/uploads/2021/07/4-Coastline_changes_2021-07-06.pdf
- Demir, N., Oy, S., Erdem, F., Şeker, D. Z., & Bayram, B. (2017). Integrated shoreline extraction approach with use of Rasat MS and SENTINEL-1A SAR Images. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4(1), 445–449.
- Elgohary, T., Mubasher, A., & Salah, H. (2017). Significant deep wave height prediction by using support vector machine approach (Alexandria as case of study). *International Journal of Current Engineering and Technology*, 7(1), 135–143.
- Elnabwy, M. T., Elbeltagi, E., El Banna, M. M., Elshikh, M. M., Motawa, I., & Kaloop, M. R. (2020). An Approach Based on Landsat Images for Shoreline Monitoring to Support Integrated Coastal Management-A Case Study, Ezbet Elborg, Nile Delta, Egypt. *International Journal of Geo-Information*, 9(4), 199–218.
- Ge, X., Sun, X., & Liu, Z. (2014). Object-oriented coastline classification and extraction from remote sensing imagery. *Remote Sensing of the Environment: 18th National Symposium on Remote Sensing of China. International Society for Optics and Photonics*. May, 2014. <https://doi.org/10.1117/12.2063845>.
- Goldstein, E. B., Coco, G., & Plant, N. G. (2019). A review of machine learning applications to coastal sediment transport and morphodynamics. *Earth-Science Reviews*, 194(1), 97–108.
- Hasan, H., Shafri, H.Z.M., & Habsih, M. (2019). A Comparison Between Support Vector Machine (SVM) and Convolutional Neural Network (CNN) Models for Hyperspectral Image Classification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/357/1/012035>.
- Horiachyn, Y. N., & Ivanov V. A. (2010). Modern conditions of the Black Sea coast of the Crimea. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 10, 87–92 [in Ukrainian].
- Kattenborn, T., Schiefer, F., Frey, J., Feilhauer, H., Mahecha, M., & Dormann, C. (2022). Spatially autocorrelated training and validation samples inflate performance assessment of convolutional neural networks. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 5, Article 100018. <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2022.100018>
- Kokkinos, I. (2016). Pushing the boundaries of boundary detection using deep learning. *4th International Conference on Learning Representations (ICLR 2016)*, 4.

Kotolupova, I. P. (2014). Coastal management of the Black Sea (on the example of the Crimea). *Optimization and Protection of Ecosystems*, 11, 76–81. http://nbuv.gov.ua/UJRN/eco00_2014_11_10

Krasovskiy, H., & Petrosov, V. (2003). Informatsiini tekhnolohii kosmichnoho monitorynu vodnykh ekosystem ta prohnouzu vodospozhyvannia mist. Nauk. dumka [in Ukrainian].

Lialko, V. I., Fedorovskyi, O. D., Popov, M. O. (2006). Bahatospektralni metody dystantsiinoho zonduvannia Zemli v zadachakh pryrodokorystuvannia. Nauk. dumka [in Ukrainian].

Liu, H., & Jezek, K. C. (2004). Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating Canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(5), 937–958.

Liu, H., Luo, J., Sun, Y., Xia, L., Wu, W., Yang, H., Hu, X., & Gao, L. (2019). Contour-oriented Cropland Extraction from High Resolution Remote Sensing Imagery Using Richer Convolution Features Network. *8th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2641240>

Martyniuk, V., & Tomchenko, O. (2021). The use of remote sensing of the Earth to assess the natural and anthropogenic transformations of lakes in the Polissya region. *Ukrainian journal of remote sensing*, 8(2), 27–35 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.2.194>

Maulik, U., & Chakraborty, D. (2017). Remote Sensing Image Classification: A survey of support-vector-machine-based advanced techniques. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5(1), 33–52. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2016.2641240>

Okhrimchuk, R., Demidov, V., & Brudko, K. (2022). Semantic segmentation of Western Crimean coastline for high-resolution satellite

images using deep learning based on U-Net architecture. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov 2022. (p. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580213>

Okhrimchuk, R., Tishaiev, I., & Zatserkovnyi, V. (2020). *Anticlines Prediction Using Deep Learning*. *26th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20202136>

Rogers, M. (2020). *Machine Learning and remote sensing applications to shoreline dynamics* (Doctoral thesis). <https://doi.org/10.17863/CAM.84999>

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, *Proceedings of the International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*. Munich, Germany: Springer, 234–241.

Starodubtsev, V.M. (2019). Coastline change in the Sakarya river mouth (Turkey). *Scientific reports of NUBiP of Ukraine*, 4(80). <http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2019.04.001>

Tomchenko, O., Mazurkiewicz, L., & Malets, A. (2017). Study of Dnieper's islands' shoreline change dynamics within Kiev region (at the example of Velykiy Pivnichnyi island). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography*, 1/2(66/67), 84–88 [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2017.66.12>

Xie, S., & Tu, Z. (2015). Holistically-nested edge detection. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 07–13 December 2015. <https://doi.org/10.1109/ICCV.2015.164>

Отримано редакцією журналу / Received: 14.07.23
Прорецензовано / Revised: 23.10.23
Схвалено до друку / Accepted: 21.02.24

Роман ОХРИМЧУК¹, асп.
ORCID ID: 0009-0009-4910-412X
e-mail: romanokhrimchuk@gmail.com

Всеволод ДЕМИДОВ¹, канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0003-9472-6530
e-mail: demidov@knu.ua

Катерина СЛЮСАР¹, магістр
ORCID ID: 0009-0001-2151-6562
e-mail: katyabru31@gmail.com

Владислав ЛУКОМСЬКИЙ¹, асп.
ORCID ID: 0000-0003-2282-3254
e-mail: lukoma770@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВИВЧЕННЯ ЕКОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ ЗАХІДНОГО УЗБЕРЕЖЖА КРИМСЬКОГО ПІВОСТРОВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ

Вступ. Моніторинг зміни контурів берегових ліній є актуальним завданням у галузі екологічних, геологічних та інформаційних досліджень. Однак такі завдання є комплексними і вимагають використання сучасних методів обробки та аналізу даних, у тому числі даних дистанційних зондувань Землі. Одним із сучасних підходів для вирішення такого класу завдань є використання методів машинного навчання, чому й присвячені дослідження у цій статті. Об'єктом дослідження авторів є берегова лінія вздовж узбережжя західної частини Кримського півострова, дослідження якої традиційними методами стали неможливими через тимчасову окупацію Кримського півострова з 2014 року. В останнє десятиліття берегова лінія Криму могла зазнати значних змін у результаті антропогенної діяльності (у тому числі пов'язаної з військовими діями) та зсувно-абразивних процесів. У цьому дослідженні автори окреслюють дослідження змін берегової лінії західної частини Кримського півострова за останнє десятиліття.

Методи. Авторів використовували моделі CNN (U-Net model) для ефективного розпізнавання берегової лінії та її меж на супутникових знімках без необхідності ручної векторизації.

Результати. Дослідження включало розробку коду Python для автоматичного створення звітів, що включають інформацію про точність мережі (0.95) та функції втрат (0.19), що полегшило оцінку різних підходів та методів. Додатково в ході дослідження було створено сценарії використання навченої мережі в задачі семантичної сегментації та переведення результату моделі сегментації у векторизований результат контурів берегової лінії Кримського півострова, який був представлений у вигляді ймовірного растру.

Висновки. Використання такого підходу корисне для моніторингу змін берегової лінії річок, морів та озер на всій території України.

Ключові слова: берегова лінія, згорткова нейронна мережа, модель U-Net, Кримський півострів.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 1(104)

Відповідальний за випуск Олександр Меньшов
Chief publication manager O. Menshov

Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова
Computer processing of the articles by O. Kozionova

Редактор І. Нечаєва

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 15,34. Наклад 300. Зам. № 224-10947.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 29.02.24

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; (38044) 239 31 28
E-mail: vpc@knu.ua; vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
http: vpc.knu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02