ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

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

ГЕОЛОГІЯ **1(108)/2025**

Засновано 1958 року

УДК 504+550+551+552+624
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР	**Вижва Сергій, д-р геол. наук, проф.** (Україна)
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	**Албані Абдер Ель, д-р філософії, проф.** (Франція); **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); **Де 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); **Стародуб Юрій, д-р фіз.-мат. наук, проф.** (Україна); **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"** **19.02.25 (протокол № 11)**
Зареєстровано	**Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення** **Рішення № 1089 від 28.03.24** **Ідентифікатор друкованого медіа: R30-03800**
Атестовано	**Міністерством освіти і науки України (категорія А)** **Наказ № 1412 від 18.12.18**
Індексування	**Scopus, Web of Science (квартиль 4, імпакт фактор 0.2), Research Bib, Google Scholar, Crossref**
Засновник та видавець	**Київський національний університет імені Тараса Шевченка** **Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"** **Свідоцтво про внесення 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: vpc@knu.ua**

© Київський національний університет імені Тараса Шевченка, ВПЦ "Київський університет", 2025

BULLETIN

TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

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

GEOLOGY **1(108)/2025**

Established in 1958

UDC 504+550+551+552+624
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108

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)**; 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)**; Yurii Starodub, DSc (Phys. & Math.), Prof.** (Ukraine)**; Vesnaver Aldo, PhD, Prof.** (Italy)**; Vyzhva Zoya, DSc (Phys. & Math.), Prof.** (Ukraine)**; Zacerkovniy Vitaliy, DSc (Tech.), Prof.** (Ukraine)**; Zagnitko Vasyl, DSc (Geol. & Mineral.), Prof.** (Ukraine)**; Zeng Qingli, PhD** (China)

Address	**USI "Institute of Geology"** **90, Vasylkivska 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"** **19.02.25 (protocol № 11)**
Registered by	**the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine** **Decision № 1089 of 28.03.24** **Identifier of printed media: R30-03800**
Certified by	**the Ministry of Education and Science of Ukraine (category A)** **Order № 1412 dated 18.12.18**
Indexing	**Scopus, Web of Science (Quartile 4, Impact Factor 0.2), 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", 2025

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

БАЙРАК Галина
Геолого-геоморфологічні фактори морфодинаміки малих річок (на прикладі річки Чечви, притоки Лімниці) 5

ГЕОФІЗИКА

МЕНЬШОВ Олександр, **ГОРОШКОВА Лідія, ГОЛУБ Олександр, ГОРОШКОВ Станіслав**
Магнітні дослідження донних відкладів та ґрунтів як інструмент виявлення небезпечних геодинамічних екзогенних процесів на прикладі заповідника Хортиця.....15
КАРПЕНКО Іван, ЧУПРИНА Анастасія, КАРПЕНКО Олексій
Термічна зрілість порід девону в аспекті їх літолого-фаціальної і вікової належності. Північний і південний борти Дніпровсько-Донецької западини 22
ТОНХА Оксана, МЕНЬШОВ Олександр, ЛІТВІНОВ Дмитро, БОНДАР Ксенія, ГЛАЗУНОВА Олена, ЛІТВІНОВА Олена, ПІКОВСЬКА Олена, ЗАБАЛУЄВ Віктор
Оцінка рівнів забруднення ґрунтів півдня України, пошкоджених воєнними діями 30
БІЛИЙ Тарас, ГЛАВАЦЬКИЙ Дмитро, ПОЛЯЧЕНКО Євген, МЕЛЬНИК Галина, ЧЕРКЕС Семен, ЛІТВІНОВ Дмитро
Ступінь деградації ґрунтів та утворення аерозолів із продуктів вибухів унаслідок бойових дій в Україні.....39
РУСАЧЕНКО Наталія, КУЗЬМЕНКО Павло, ВИЖВА Сергій
Аналіз швидкісних аномалій та результати динамічної інтерпретації сейсмічних даних при дослідженні складно побудованих газових покладів 47
ПІГУЛЕВСЬКИЙ Петро, ДОВБНІЧ Михайло, ТЯПКІН Олег, МЕДВЕДЄВА Ольга, АНІСІМОВА Лариса
Кумулятивний вплив гірничої промисловості та сільського господарства на гідрогеохімічний стан території (на прикладі Південного Кривбасу) 54
АХМАДОВ Тофік, **АСАДЛІ Амікиші**
Поліпшення візуалізації геологічної структури району Говсан, Азербайджан, за допомогою VSP.....61

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

КВАСНИЦЯ Ірина
Морфологія сидериту з геологічних утворень України.....67
ГЕЛЕТА Олег, СЕРГІЄНКО Ігор
Управління якісними характеристиками виробів з лабрадориту Українського щита шляхом урахування типів обробки їх поверхні 73

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

МАЛЬКОВА Яна, ПАНАСЮК Микола, СОСОННА Наталія, БАГРІЙ Сергій
Визначення коефіцієнта фільтрації гравійно-галькового алювіального водоносного горизонту як одного з основних фільтраційних параметрів гідрогеологічної системи 79

ГЕОІНФОРМАТИКА

ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій, ВОРОХ Віктор, ГЛОБА Ольга, МІРОНЧУК Тетяна, СЮЙВА Ірина
Агрохімічний аналіз ґрунтів у технологіях прецизійного землеробства на прикладі Чернігівської області 85
ГУДАК Василь, КРІЛЬ Тетяна, ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій
Дистанційний моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні як індикаторів деформації підземних споруд.....94
ЛЯШЕНКО Дмитро, ЗОБНІВ Іванна, ЦВИК Олександр
Картографування мінної небезпеки за даними великомасштабних багатоспектральних знімань.....103

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

BAYRAK Galyna
Geological and geomorphological factors of the small rivers morphodynamics (on the example of the Chechva river, Limnitsa tributaries) 5

GEOPHYSICS

MENSHOV Oleksandr, HOROSHKOVA Lidiia, GOLUB Alexander, HOROSHKOV Stanislav
Magnetic studies of sediments and soils as a tool for detection of dangerous geodynamic exogenic processes on the example of the Khortysya reserve 15
KARPENKO Ivan, CHUPRYNA Anastasiia, KARPENKO Oleksii
Thermal maturity of Devonian rocks in terms of their lithological-facies and age affiliation. Northern and southern sides of the Dnipro-Donets basin 22
TONKHA Oksana, MENSHOV Oleksandr, LITVINOV Dmytro, BONDAR Kseniia, GLAZUNOVA Olena, LITVINOVA Olena, PIKOVSKA Olena, Viktor ZABALUEV
Assessment of soil pollution levels in southern Ukraine damaged by military actions 30
BILYI Taras, HLAVATSKYI Dmytro, POLIACHENKO Ievhen, MELNYK Galyna, CHERKES Semen, LITVINOV Dmytro
The degree of soil degradation and aerosol formation from explosion products resulting from hostilities in Ukraine 39
RUSACHENKO Nataliia, KUZMENKO Pavlo, VYZHVA Serhii
Analysis of velocity anomalies and results of seismic data dynamic interpretation in the study of complex gas reservoirs 47
PIGULEVSKIY Petro, DOVBNICH Mykhailo, TIAPKIN Oleh, MEDVEDIEVA Olha, ANISIMOVA Larysa
Cumulative impact of the mining industry and agriculture on the hydrogeochemical state of the territory (based on the example of Southern Kryvbas) 54
AHMADOV Tofik, ASADLİ Amikishi
Improving the visualization of the geological structure of the Hovsan area, Azerbaijan using VSP 61

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

KVASNYTSIA Iryna
Morphology of siderite from geological formations of Ukraine 67
GELETA Oleg, SERGIIENKO Igor
Management of the quality characteristics of labradorite products of the Ukrainian shield taking into account the types of their surface processing 73

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

MALKOVA Yana, PANASIUK Mykola, SOSONNA Nataliia, BAHRII Serhii
Determination of the filtration coefficient of the gravel and pebble alluvial aquifer as one of the main filtration parameters of the hydrogeological system 79

GEOINFORMATICS

ZATSERKOVNYI Vitaliy, VOROKH Victor, HLOBA Olga, MIRONCHUK Tetiana, SIUIVA Iryna
Agrochemical analysis of soils in precision farming technologies: a case study of the Chernihiv region 85
HUDAK Vasyl, KRIL Tetiana, ZATSERKOVNYI Vitaliy
Remote sensing analysis of vertical surface displacements as an indicator of underground structure deformations 94
LIASHENKO Dmytro, ZOBNIV Ivanna, TSVYK Oleksandr
Mapping mine risk using large-scale multispectral imagery 103

УДК 551.4
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.01

Галина БАЙРАК, канд. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-4802-2706
e-mail: halyna.bayrak@lnu.edu.ua
Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, Україна

ГЕОЛОГО-ГЕОМОРФОЛОГІЧНІ ФАКТОРИ МОРФОДИНАМІКИ МАЛИХ РІЧОК (НА ПРИКЛАДІ РІЧКИ ЧЕЧВИ, ПРИТОКИ ЛІМНИЦІ)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік)

В с т у п . *Малі ріки є важливим елементом у структурі земної поверхні, беруть активну участь у формуванні її морфологічних обрисів. Вони відіграють вагому роль у функціонуванні середніх і великих рік, впливають на реалізування загальної природозберігаючої стратегії використання водних ресурсів у конкретному регіоні. Проблема вивчення стану і змін малих річок, а також чинників, які зумовлюють зміни, є багатогранною і потребує глибоких досліджень. Малі річки найбільше залежать від геолого-геоморфологічних чинників, тому важливим у цьому плані є вивчення саме їхнього впливу на зміни русла.*

М е т о д и . *Для дослідження морфодинаміки русла Чечви було використано топографічні карти 1906, 1910, 1927, 1944, 1981 років, аерофотознімки 1952, 1967, 1978 років та космознімки 2005–2024 років. Геокодування та оцифрування русла виконувалось у програмі QGIS. Для аналізу розподілу процесів ерозії–акумуляції у руслі вздовж поздовжнього профілю річки розроблено спеціальний інтерактивний модуль у середовищі MS Visual Studio. Картографічні та польові дослідження застосовано для виявлення характеристик впливу геологічних та геоморфологічних факторів на морфодинаміку русла.*

Р е з у л ь т а т и . *На основі аналізу різночасових матеріалів досліджено морфодинаміку р. Чечви, лівої притоки Лімниці. Вона проявилася поперечними та поздовжніми зміщеннями русла як у гірській, так і в передгірській її частині. У гірській частині виявлено поперечні зміщення русла, зміни вершин меандр, зміни кількості рукавів. У передгірській частині спектр змін ширший: міграції русла із зміною його прямої форми на звивисту та меандровану і, навпаки, з меандрованої на пряму, розвернення випуклості вигинів на 180°, зміни ширини і довжини поясу меандрування, морфологічних типів і параметрів меандр. З геологічних факторів найбільше вплинули літологічний склад порід, зокрема наявність флішових відкладів у гірській та пухких у передгірській частинах долини, гранулометричний склад порід, їхня шарувата текстура, велика тріщинуватість та значна кількість відслонень на берегах. З геоморфологічних факторів суттєвими стали морфометрія басейну з великими перепадами висот та густим і глибоким розчленуванням, розлогі форми поперечного профілю долини, зміни ухилу і падіння річки, параметри заплави і русла.*

В и с н о в к и . *Геолого-геоморфологічні фактори мають як спонукальний, так і обмежувальний вплив на морфодинаміку русел малих річок.*

К л ю ч о в і с л о в а : *морфодинаміка, сучасні флювіальні процеси, динаміка русла, малі річки, геологічні фактори, геоморфологічні фактори, Українські Карпати.*

Вступ

Відкритість джерел різночасової інформації, доступність і поширення ГІС-технологій, які дають змогу цю інформацію опрацювати, зумовили зростання цікавості до вивчення динаміки русел та факторів, що її спричинюють. Попередні 15 років знаменувалися виходом численних публікацій про горизонтальні та вертикальні деформації річок Карпатського регіону за 100-річний період. Досліджено динаміку русел таких карпатських рік: Дністра на відрізку Стрілки–Ст.Самбір (Байрак, 2012), Галич–Заліщики (Бурштинська та ін., 2017), Розвадів–Галич (Радзій, Заяць, & Третяк, 2018); Стрия на відрізку Стриганці–гирло Стрия (Горішний, 2014); Стривігора, Підбужа (Байрак, 2016, 2017); Бистриці (Сельський, & Ковальська, 2007); Сукелі (Rybak, & Dubis, 2021); Яблуньки й Оряви (Пилипович, & Ковальчук, 2017); Лімниці, Латориці, Тересви та ін. рік верхнього басейну Тиси (Ободовський та ін., 2010, 2012, 2018); Прута на відрізку перед м. Чернівці (Ющенко, 2005); Тиси на перетині Вулканічного пасма (Байрак, 2011). Велика частина цих публікацій присвячена дослідженню морфодинаміки передгірських ділянок річок, оскільки роль обмежувальних факторів незначна і русла виявляють виразні зміни саме на передгірських відрізках. У гірських районах зростає роль геологічних і геоморфологічних факторів: вони мають як обмежувальний, так і спонукальний вплив особливо на динаміку малих річок.

У середині минулого століття вчені почали розвивати класифікації русел залежно від геолого-геоморфологічних умов. Так, М. І. Маккавеєв (1955) обґрунтував необхідність відокремлення рівнинних, напівгірських і гірських типів русел річок. A. Schumm (1956) за літологічною основою поділив русла на такі, що закладені в корінних та алювіальних відкладах (Schumm, 1977). K. Krzemen (1976) і пізніше M. Klimaszewski (1978) розділили русла на скельні, скельно-алювіальні та алювіальні (Krzemień, 2012). Z. Raczkowska, досліджуючи річки північних областей, виділила русла залежно від формування їх у льодовиковій чи перигляціальній зоні, у флювіогляціальних чи льодовикових відкладах (Raczkowska, 1983). Для гірських річок Р. С. Чалов (1979) запропонував три типи руслових форм залежно від характеру переміщення наносів гірськими потоками: 1) з розвиненими алювіальними формами; 2) з нерозвиненими алювіальними формами; 3) порожнисто-водоспадне (Ющенко, 2005). М. Бухін, О. Кафтан та В. Базилевич виділили такі типи русел річок Українських Карпат і Передкарпаття: нерозмиваючі русла з нечітко вираженими берегами; стиснені русла зі стрімкими берегами; стиснені русла з необмеженим надходженням наносів; русла обмеженого меандрування; осередкові русла; русла незавершеного меандрування; русла вільного меандрування (Бухін та ін., 1974). О. Ф. Кафтан для річок Українських Карпат виділив також каналізовані та ступінчасті русла (Кафтан, 1983). Згодом додано ще два типи: селеве та скалисте або лоткове.

K. Krzemień вказує, що при характеристиці рік слід зазначати такі геологічні умови: стратиграфію порід; літологію; типи седиментаційного матеріалу; гранулометричний склад відкладів; відсоток відслонень на берегах; узгодження русла із простяганням верств; падіння пластів порід відносно поздовжнього профілю ріки (River channels…, 1999). О. Паланичко розробила функціонально-басейнову схему аналізу дії чинників на умови русло-

© Байрак Галина, 2025

формування річок Передкарпаття, виділила ієрархічні рівні розгляду загальних, транзитних і місцевих чинників (Паланичко, 2023). Вплив структурно-літологічних особливостей на типи і зміни русел Стрия, Бистриці і Лімниці відзначили Х. Бурштинська та її співавтори (Burshtynska et al., 2024). Описуючи геоморфологічні умови розвитку річкових русел зазвичай з'ясовують: гіпсометричне положення (рівнинне, напівгірське, гірське); розчленованість рельєфу; відносні перевищення витоків над гирлом; ухил днища і характер поздовжньо профілю; морфометрію русла, заплави, берегів; морфологію долини в плані.

Руслову морфодинаміку та вплив на неї геолого-геоморфологічних чинників актуально дослідити для річки, яка має гірську та передгірську частину, що зроблено на прикладі ріки Чечви, лівої притоки Лімниці.

Мета роботи – з'ясувати основні аспекти морфодинаміки русла р. Чечви протягом 100-річного періоду за допомогою ГІС-технологій та зосередити увагу на геолого-геоморфологічних факторах його формування.

Методи

ГІС-технології. У програмному середовищі QGIS-3.28 виконано геокодування серії різночасових карт, аерофотознімків та супутникових даних. Використано ресурс OSM Standart для отримання сучасної векторизованої лінії русла, а також оцифровано русло Чечви станом на різні роки на підставі різночасових даних.

Картографічні методи. Для векторизації русла за різні часові періоди використано історичні топографічні карти 1906, 1910, 1927, 1944 років з ресурсу "Mapy archiwalne Polski i Europy", а також топографічні карти станом місцевості на 1981 р.

Методи ДЗЗ. Динаміку русла проаналізовано за аерофотознімками 1952, 1967, 1978 років, отриманих з фондів "Західукргеологія". Використано супутникові знімки з ресурсу Google Earth 2005–2021 рр. розрізнення 1 м/пікс та ресурсу EO Browser 2024 р. розрізнення 10 м/пікс.

Методи комп'ютерного моделювання. Застосовано авторський модуль для відображення приуроченості процесів ерозії, транспортування та акумуляції до поздовжнього профілю річки. Модель явища ерозії–акумуляції потоку реалізовано на алгоритмічній мові С++ в середовищі MS Visual Studio 2012 Express з використанням відкритої графічної бібліотеки OpenGL (Байрак, & Муха, 2015). Абсолютні висоти дна Чечви та їхні координати вздовж падіння річки отримано з ресурсу Google Earth. Дані щодо незриваючої швидкості досліджено в польових умовах. Дані щодо зриваючої швидкості розраховано на основі витрат води у паводок, отриманих з Івано-Франківського центру гідрометеорології. Моделюючи швидкості потоку, отримано модель ерозії–акумуляції вздовж поздовжнього профілю р. Чечви.

Метод польових спостережень. Застосовано для дослідження відслонень порід на берегах річки; вивчення літологічного та гранулометричного складу алювіальних відкладів руслових форм; параметрів потоку; визначення морфометрії русла, заплави і терас.

Результати

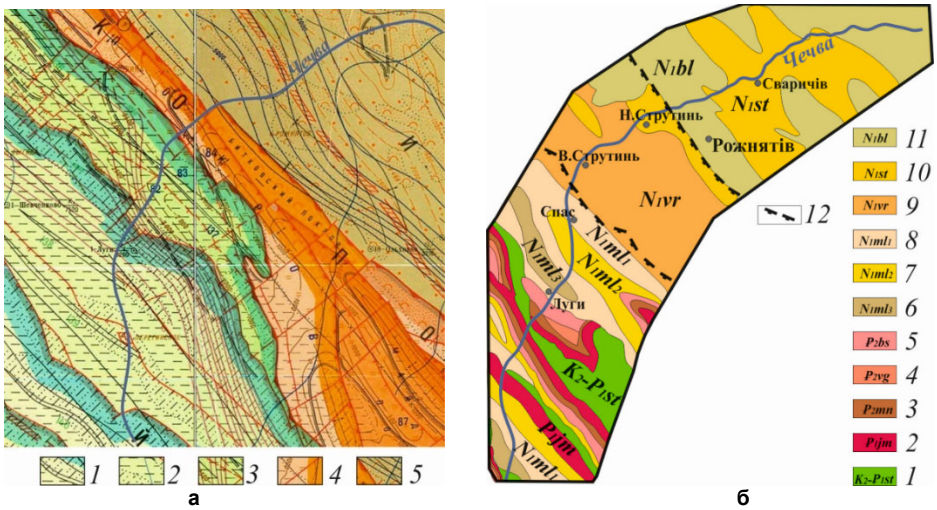
Р. Чечва починається на схилах хребта Аршиця у Ґорґанах на висоті 1240 м. Її довжина становить 56 км (за даними вимірювань на космознімку Google Earth), площа басейну 548 км^2 (Wiki). Середньомісячні витрати у маловодний період сягають 6,5 м^3/с, у багатоводний 18,5 м^3/с (за даними гідропоста с. Спас). Швидкість течії в середньому 2,2 м/с, у паводок зростає до 13–20 м/с. Річка має мішане живлення, переважно дощове, із паводковим режимом. На протязі 35 км Чечва тече серед гірських хребтів Карпат, 21 км – на Приґорґанському Передкарпатті.

***Характеристика факторів**. Структурно-тектонічні чинники.* Басейн р. Чечви розташований на стику двох мегаструктур: Карпатської складчастої системи і Передкарпатського прогину. В межах Карпатської мегаструктури басейн належить до структурної зони Скибового покриву, який насунутий на Бориславсько-Покутську структурну зону Передкарпатського прогину. Витоки Чечви лежать у межах Сколівської скиби, від впадіння притоки Менічівки до с. Луги басейн перетинає Орівська скиба, від с. Луги до В. Струтиня – Берегова скиба (рис. 1*а*). Скиби являють собою південно-східні крила антикліналей, розділені одна від одної регіональними насувами. Характерне загальне моноклінальне залягання порід з південно-західним нахилом під кутом 45–70º. У тиловій частині Сколівської скиби розташована Круглинська антикліналь, в Орівській скибі – Ілемська і Сихлівська антиклінальні складки, в Береговій – Спас-Лопянецька складка (Державна…, 2007). Між ними сформувалися синклінальні западини, до яких приурочені улоговиноподібні розширення долин і саме в них відбувається сучасна морфодинаміка гірської частини русла. Структура Скибових Карпат, за даними І. Гофштейна (1964), зазнала неотектонічних рухів, активна фаза яких у пліоцені мала вирішальне значення на формування рельєфу гірської споруди. Загальна величина підняттів з початку міоцену, за даними вченого, становила 1100–1800 м. У найактивнішому регіоні Карпат – Скибових Ґорґанах, до яких належить басейн Чечви, річкова мережа була частково або повністю зруйнована в час останньої (верхньопліоценової) фази складчастості (Кравчук, 2021). Подальші плейстоценові підняття Карпат спричинили значні врізання річок і формування сучасних долин. Виявлено пачку давнього алювію на висоті 25–30 м над урізом води у верхній течії річки, південніше с. Липовиця, що говорить про посилену глибинну ерозію Чечви у цей період. Подальші голоценові підняття були теж досить інтенсивними, про що свідчить 4,0–6,5-метровий уступ першої надзаплавної тераси річки. Цей уступ частково обмежує масштабні переформування русла, проте є джерелом для формування руслових форм, які в екстремальні паводки впливають на горизонтальні деформації русла.

Нижня течія Чечви на Приґорґанському Передкарпатті належить до Передкарпатського прогину, зокрема перетинає внутрішні Бориславсько-Покутську і Самбірську структурно-фаціальної зони. Ці тектонічні покриви складені головно міоценовими моласовими відкладами і насунуті на утворення зовнішньої зони прогину. Основна частина Бориславсько-Покутської зони розташована під Скибовим покривом і являє собою систему (яруси) складок, які мають кулісоподібне впорядкування та підпорядковані загальній структурі зони. Самбірський покрив ускладнений системою насувів другого порядку, які формують витягнуті в субкарпатському напрямі тектонічні луски (Державна…, 2007). За даними деяких авторів, у гірській частині Карпат напрям русла і деформації ріки зумовлюють поперечні розломи і тріщинуваті зони покривно-складчастої структури, а на Передкарпатті морфодинаміка річки визначається структурно-літологічними особливостями зони (Burshtynska et al., 2024). Передкарпаття зазнавало диференційованих підняттів у пліоцен-плейстоценовий і голоценовий періоди, про що свідчать відносні висоти терас. Так, на ділянці виходу з гір висота першої надзаплавної тераси Чечви становить 3–4 м, що засвідчує відповідну амплітуду підняття у цей

період. Сучасні тектонічні рухи вплинули на формування заплави, врізаної на 1–1,5 м, в межах якої відбувається морфодинаміка русла.

Літологічні фактори. У гірській частині Чечва прорізає комплекси порід різної міцності, які зумовлюють вервицеподібну будову долини із ділянками розширень та звужень. До міцних порід належать груборитмічні флішові відклади стрийської світи (K_2–P_1st), масивні та грубошаруваті пісковики ямненської і вигодської світ (P_1jm–P_2vg), а до податливих – тонкоритмічні флішові відклади з переважанням аргілітово-алевролітових прошарків манявської (P_2mn), бистрицької (P_2bs) та здебільшого менілітової світ (P_3ml_1, N_1ml_2, N_1ml_3) (Державна…, 2007) (рис. 1*б*). У складі манявської світи на берегах річки виявлено унікальні брили конгломератів із включеннями брекчії, кварцу, уламків пісковиків манявської світи та зрідка метаморфічних сланців Лежайського масиву. Характерною особливістю верхньої менілітової підсвіти (N_1ml_3) є наявність потужних лінз темно-сірих туфів, які отримали назву "чечвинських". Частка відслонень корінних порід на берегах річки становить 40 % (22,4 км, за даними вимірювань у QGIS) (рис. 2). Відслонюються здебільшого шаруваті флішові відклади з лінзами туфів, які активно постачають дрібний уламковий матеріал у русло завдяки процесам осипання, обвалювання. Під час паводків потік часто розмиває колювіальні відклади у підніжжі схилів, переносить матеріал нижче за течією (рис. 3). Такі береги відносимо до середньостійких. Вздовж ріки зрідка відслонюються масивні пісковики, найдовша їхня ділянка – південніше с. Луги, у т. зв. долині прориву Чечви. Це найбільш стійкі до розмиву береги, але їхня довжина невелика.



а **б**

Рис. 1. а –фрагмент тектонічної карти досліджуваного регіону (Тектонічна…, 1986).
Умовні позначення. Карпатська складчаста гірська споруда. Скиби: *1* – Сколівська, *2* – Орівська, *3* – Берегова. Передкарпатський прогин: *4* – Бориславсько-Покутська, *5* – Самбірська структурно-фаціальні зони;
б – фрагмент геологічної карти, виконаний на основі державної геологічної карти України листа M-35-XXV масштабу 1 : 200 000 (2007).
Умовні знаки. Скибовий покрив Зовнішніх Карпат: *1* – стрийська світа. Фліш різноритмічний, сірий, карбонатний; *2* – ямненська світа. Пісковики світлі, масивні з прошарками гравелітів, конгломератів та аргілітів; *3* – манявська світа. Фліш тонкоритмічний зелено-сірий; *4* – вигодська світа. Пісковики грубошаруваті та масивні; *5* – бистрицька світа. Аргіліти зелені та зелено-сірі, фліш сіро-зелений, тонкоритмічний; *6* – менілітова світа. Нижня підсвіта. Аргіліти чорні невапнисті бітумінозні з прошарками алевролітів і пісковиків; *7* – менілітова світа. Середня підсвіта. Тонкоритмічне перешарування сірих вапнистих аргілітів, алевролітів, пісковиків; *8* – менілітова світа. Верхня підсвіта. Аргіліти чорні та сірі, флішоїдне перешарування вапнистих аргілітів, алевролітів, пісковиків; потужна лінза туфів ("чечвинских"). Передкарпатський прогин, Бориславсько-Покутський покрив: *9* – воротищенська світа. Перешарування глин аргілітоподібних і алевролітів; *10* – стебницька світа. Перешарування глин і аргілітів строкатих, сірих, пісковиків та алевролітів, пачки пісковиків. Самбірський покрив: *11* – балицька світа. Глини темні масивні та тонкошаруваті. *12* – зони фронтальних насувів

У передкарпатській ділянці ложе р. Чечви формують глинисті відклади: ближче до гір – воротищенської світи (N_1vr), далі – піщанисті відклади стебницької світи (N_1st) і ближче до гирла – щільні глини балицької світи (N_1bl). Вони перекриті зверху делювіально-алювіальними суглинками потужністю 5–10 м (Кравчук, 2021). Береги, складені пухкими алювіальними, делювіальними, рідше – пролювіальними відкладами, зазнають бокової ерозії та зміщення русла річки. Ці відклади нестійкі, піддаються активним розмивам під час паводків.

Уламковий, піщаний та глинистий матеріал, який надходить у потік із відслонень, акумулюється на дні та берегах річки в місцях зменшення ухилу дна. У передгірській частині Чечва перевантажена наносами, частина відкладеного матеріалу сформувала порівняно великі боковики та кілька островів, площа яких мало змінюється під час сезонних водопіль, проте русло часто прокладає в них нові шляхи. Глинисті частинки, які осіли на дні, під час початку дощу швидко скаламучують потік і збільшують його енергію. Недостатню кількість наносів простежуємо у звуженнях долини, там розвивається бокова ерозія з підмивами берегів.

Проаналізовано *склад алювіальних відкладів* руслових форм, від якого залежить швидкість їхнього розмиву. З уламків пісковиків (60 %), часток аргілітів (30 %), туфів, рідше кременів складаються руслові форми у гірській частині ріки. Переважають гравійно-дрібногалькові суміші з лусками аргілітів. На нижньому гірському відрізку гранулометричний склад відкладів змінюється в бік зростання величини уламків, проте 50 % суміші включає гравійний матеріал, з'являються валуни. У передкарпатській частині долини у складі руслового алювію

збільшується частка піску. Руслові форми складені гравелисто-гальковими сумішами із вмістом гравію та гальки (до 60 %), валунів (10 %) і піщано-глинистого матеріалу (30 %). У нижній частині передгірської течії Чечви частка піску зменшується, частка гальки, гравію, валунів зростає до 80 %. Величина гальок у середньому становить 4 см, тобто переважають середні за розмірами уламки. Валуни сягають 15–16 см. За нашими спостереженнями переформування руслових форм на передкарпатській ділянці виникає лише після великих водопіль. Завдяки значному вмісту міцних порід у складі руслових форм після сезонних паводків відбувається лише незначний розмив фронтальних частин та акумуляція на тилових частинах.

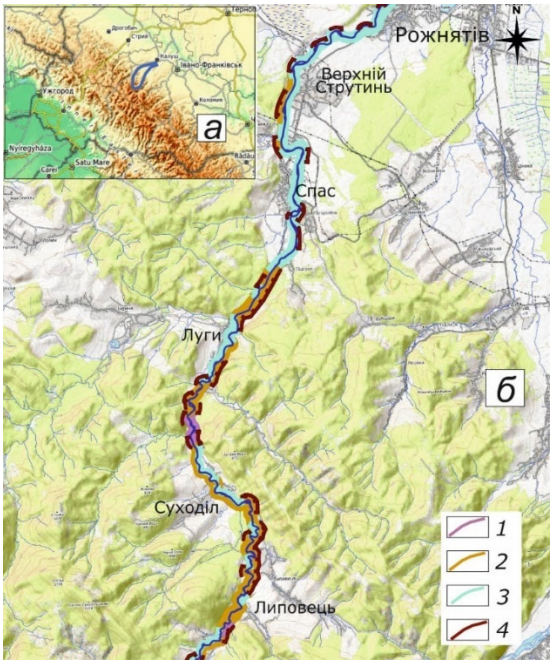
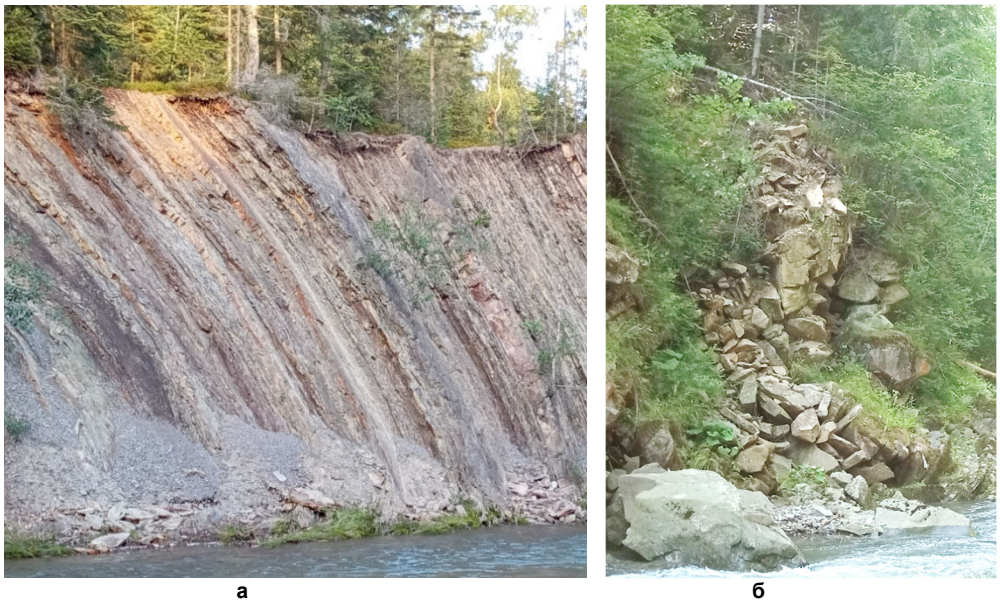


Рис. 2. а – розташування басейну Чечви у межах Українських Карпат (виділено синім);
б – типи берегів Чечви: *1* – стійкі до розмиву береги у міцних породах (P_1jm–P_2vg),
2 – середньостійкі береги у шаруватих породах (фліш з лінзами туфів) (P_2mn, P_2bs, P_3ml_1, N_1ml_2, N_1ml_3),
3 – слабостійкі береги у пухких відкладах. *4* – відслонення. Основа – карта Open Street Maps, виконано в QGIS



а **б**

Рис. 3. Колювіальні відклади на берегах:
а – продукти осипання на відслоненні порід менілітової світи (N_1ml_3) на правому березі Чечви північніше с. Липовиця;
б – відклади обвалів у місцях відслонень ямненських пісковиків (P_1jm, "Долина прориву Чечви")

Форма уламків. У передкарпатській частині обчислено коефіцієнти обкатаності і сплющеності галькового матеріалу на кількох руслових формах. Вони вказують на тривалий вплив течії, під час якого уламки зазнають постійного тертя і зіткнень один з одним, а також із дном і берегами річки. Коефіцієнт обкатаності уламків у середньому становить 2,2, тобто це слабко обкатані уламки із затертими кутами і ребрами, які зберігають свою первинну форму. Цього класу обкатаності уламки набули після їхнього транспортування на відстань 17 км

ISSN 1728-3817

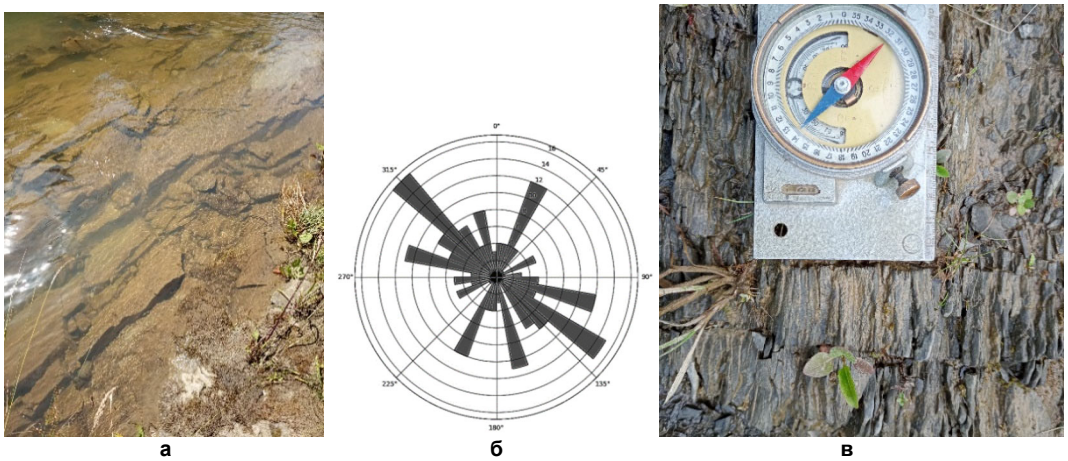
від межі гір, що говорить про значний енергетичний потенціал ріки. Обкатаність уламків 1 класу спостерігалася за 11 км від витоків річки, в околицях с. Липовиця.

Коефіцієнт сплющеності визначали за формулою $k_c=a+б/2c–1$, де *а* – довга вісь уламка, *б* – коротка, *с* – товщина уламка. Чим його значення більше, тим уламки тонші. Він великою мірою залежить від форми вихідного уламка. На боковиках Чечви коефіцієнт сплющеності гальок становить у середньому 2,0, тобто тонких уламків мало. Це означає, що відстань транспортування і час перебування уламків у воді не тривалі, зважаючи на значну швидкість течії, тому уламки не сильно сплющені. Також на сплющеність впливає твердість порід. Переважають тверді породи, зокрема дрібнозернисті кварцові пісковики ямненської світи, які зазнають слабкого стирання.

Гравійно-гальковий матеріал має досить широкий діапазон *коефіцієнта фільтрації*, який за дослідними даними становить *Кф*=5−20 і навіть 50 м/добу (Штогрин, 1963). Частіше ці величини не перевищують 15 м/добу, оскільки на них впливає склад заповнювача. За наявності піску коефіцієнт фільтрації більший, у глин – менший. Коефіцієнт фільтрації для суглинків заплавних фацій звичайно не перевищує 0,5 м/добу. Під час водопіль частина паводкових вод, які заповнюють заплаву, здійснюють інфільтрацію у поверхню ґрунту. Після водонасичення алювіального матеріалу руслових форм рівень води зростає і поступово заповнює заплаву. Тому на низинних берегах Чечви, де переважають галечники з піщаним заповнювачем, рівень вод буває дещо нижчий, затоплення менші, ніж там, де розвинуті галечники із глинистим заповнювачем, а руслові переформування менших масштабів.

Велике значення щодо стійкості порід до розмиву має їхнє *залягання* на дні річки: горизонтально, моноклінально чи під кутом. Шари міцних пісковиків утворюють пороги в руслі на багатьох відрізках гірської течії Чечви. На ділянках порожистого русла відбувається зниження рівня паводкових вод безпосередньо перед порогами, а в їхніх місцях – підвищення.

Характерною особливістю порід є їхня *тріщинуватість*. У породах, які розмиває Чечва, проявляються тріщини тектонічного генезису, вивітрювання та напластувань. Вони є тими слабкими зонами, вздовж яких відбувається руйнування порід під дією текучої води (рис. 4*а*). На формування донних уламків суттєво впливає простягання тріщин відносно течії ріки. Тріщини можуть лежати вздовж, упоперек та під кутом до течії. Переважний напрям орієнтування тріщин – субкарпатський (рис. 4*б*). Це тектонічні і тріщини напластувань, напрямлені впоперек чи по-діагоналі до напряму течії річки. Субмеридіональні тріщини на кількох ділянках суміщені з напрямом течії. У багатьох випадках це тріщини вивітрювання, розширені дією текучої води. Паводкові каламутні води найбільше поглиблюють вздовжберегові тріщини, розвинені здебільшого у пластах ямненських пісковиків (околиці с. Луги). Взаємоперпендикулярні системи тріщин найбільше розвинені в аргілітових товщах, наприклад між с. Спас і В. Струтинь (рис. 4*в*). Тріщинуватість флішових порід є тим чинником, який зумовлює розвиток різних генетичних типів екзогенних процесів на берегах. Вздовж тріщин формуються ослаблені зони, по яких проникає атмосферна волога і вода, руйнуючи і розширюючи їх. Тріщини є поштовхом до розвитку таких процесів на берегах Чечви, як осипи та ерозія, рідше обвали. Вони визначають форму та розміри окремостей: утворені внаслідок тріщинуватості уламки є більш кутастими та гострими, ніж утворені іншими чинниками. Тріщинуваті флішові породи, що відслонюються на берегах Чечви (див. рис. 2), є, з одного боку, обмежувальним фактором морфодинаміки русла, бо утворюють високі уступи, а з іншого – постачають уламковий матеріал у русло, який транспортується і творить руслові форми в улоговиноподібних розширеннях долини та Передкарпатті, впливаючи на переформування русла під час екстремальних паводків.



а **б** **в**

Рис. 4. Тріщинуватість порід у руслі Чечви:
а – вздовжберегові тріщини у масивних ямненських пісковиках на відрізку "долини прориву Чечви";
б – роза-діаграма орієнтування тріщин корінних порід у руслі та на боковиках;
в – тріщинуватість аргілітів на боковику між с. Спас і Верхній Струтинь

Геоморфологічні фактори. Важливим чинником морфодинаміки русла є рельєф басейну. Первинним чинником, який впливає на річковий стік і морфологію русла, є *орографія*, зокрема відомим фактом є збільшення кількості опадів у гірських умовах. Іншим вагомим фактором є *розчленованість басейну*, оскільки чим довші і крутіші схили, тим більша величина схилового стікання, тобто тим більша кількість опадів, що випали в басейні, стікає зі схилів і попадає у водотоки, збільшуючи їхню водність. Гірські схили басейну Чечви густо розчленовані ярами і балками, по яких стікають тимчасові потоки і збільшують притік води під час опадів. Це є позитивним для водного стоку, зважаючи на те, що його частина витрачається на інфільтрацію. Значна крутість гірських

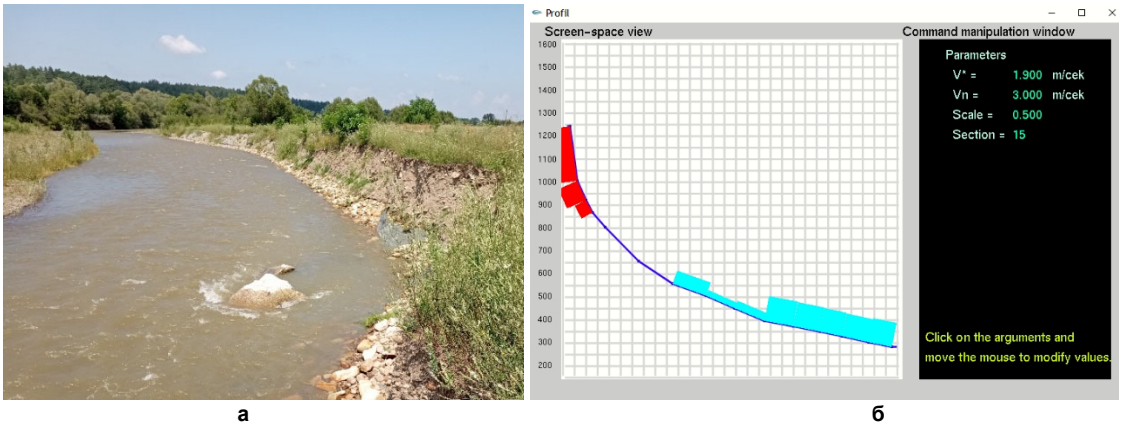
схилів басейну Чечви зумовлює розвиток *сучасних екзогенних процесів*, зокрема гравітаційних та делювіальних, які беруть участь у формуванні наносів ріки.

Морфологія долини в плані, зокрема її вервицеподібна будова з улоговиноподібними розширеннями і звуженнями, впливають на відносні висоти піків водопіль. На ділянках широкої заплави висота паводків знижується, а на стиснених ділянках – збільшується. Для Чечви характерна саме така вервицеподібна в плані долина, проте у гірській частині річка врізана в корінні відклади цокольної першої надзаплавної тераси, висота уступів якої сягає 5–6 м. Між підніжжями уступу, на плоскому дні, відбувається переформування русла на багатьох відрізках долини. Під час паводків річка підмиває підніжжя уступу тераси і перевідкладає продукти ерозії. Проте уступ не суцільний, у місцях впадіння приток, ярів і балок переривається, там поширені пухкі четвертинні відклади. Паводкові води при відносній висоті підйому 1,3 м, зрідка 2,4 м, затоплюють високу заплаву і придолинні схили у цих місцях, розмиваючи береги.

Геоморфологічні умови визначають морфодинаміку річки залежно від *поперечного профілю* долини. На верхній гірській ділянці Чечви, де переважає здебільшого глибинна ерозія, характерний V-подібний профіль річки. Оскільки водність потоку мала, днище ріки вузьке і похиле, морфодинаміка русла проявляється слабо. Для гірської течії річки в місцях улоговиноподібних розширень характерний U-подібний профіль із нешироким днищем, а в місцях звужень – асиметричний або V-подібний профілі. Морфодинаміка русла виявляється його зміщеннями від середини днища до підніжжя уступу першої надзаплавної тераси та навпаки, що становить десятки метрів, а також зміною кута розвороту меандр. На ділянці гірської течії перед виходом з гір сформувався ящикоподібний (коритоподібний) поперечний профіль річки, в межах якого виявляється морфодинаміка розгалуженого русла – від однорукавного до дворукавного, багаторукавного і знов до однорукавного русла. На верхній передгірській і половині нижньої передгірської ділянках поширена терасована (трапецієподібна) у поперечному профілі долина. У другій половині нижньої передгірської ділянки аж до гирла переважає жолобоподібна долина. Вона разом із широкою заплавою найбільше сприяють різноманітній поперечній і поздовжній русловій морфодинаміці.

Морфологія і морфометрія. Важливими аспектами, які впливають на морфодинаміку русла, є ширина заплави (днища), ухил, ширина русла. Ухил річки впливає на: 1) швидкість течії – чим ухил більший, тим течія швидша; 2) морфологію русла – за великого його значення русло вузьке і пряме; 3) рівень води – за значного ухилу він нестабільний; 4) ерозію потоку – у разі вагомого ухилу ерозія інтенсивніша, оскільки переноситься більше осадового матеріалу. Круті ухили зумовлюють великий енергетичний потенціал потоків, особливо під час водопіль, які спричинюють за інших сприятливих умов значну морфодинаміку русла. Вплив ухилу на р. Чечву найбільше проявляється в улоговиноподібних розширеннях гірської частини долини, на нижній гірській та передкарпатській ділянках. На цих ділянках ухили спадають і руслові потоки або галузяться на рукави або меандрують (рис. 5 *а*). Після водопіль саме на таких ділянках виявляються зміни русла.

На морфодинаміку русла впливає характер *поздовжнього профілю* річки. Форма кривої поздовжнього профілю безпосередньо залежить від транспортувальної здатності потоку: якщо його швидкість недостатня для подальшого транспортування наносів, відбувається акумуляція, і навпаки, якщо наносів мало, а швидкість велика, відбувається ерозія. З часом виробляється поздовжній профіль, крива якого має ввігнутий характер. Ми змоделювали інтенсивність ерозійно-акумулятивних процесів уздовж поздовжнього профілю Чечви залежно від ухилу дна і швидкості потоку (Байрак, & Муха, 2015). Моделюючи в інтерактивному режимі швидкість потоку, спостерігаємо, як зростає чи зменшується величина ерозійного врізу чи акумуляції матеріалу на профілі (рис. 5*б*). На крутому ухилі переважають процеси ерозії; ухил спадистий – домінує транспорт матеріалу з невеликою ерозією та акумуляцією; ухил пологий – зростає величина акумуляції. Поперечний профіль відображає початок зростання акумуляції матеріалу і відповідає нижній гірській течії річки. Саме із цієї ділянки відбувається динаміка не окремих елементів русла чи руслових форм, а власне зміни великих відрізків русла, поява чи зникнення руслових форм.



а б

Рис. 5. а – долина Чечви на Передкарпатті;
б – поздовжній профіль Чечви зі змодельованим розподілом ерозії–акумуляції за швидкості потоку 3 м/с

Морфодинаміка русла. *За морфологічними особливостями* виділяємо сім відрізків Чечви, на яких по-різному проявляється динаміка русла.

1) *Верхня гірська* ділянка (схили хребта Аршиця та відроги, 1240–860 м): заплава відсутня, ширина днища 4–6 м; ухил великий – 86,3 м/км; русло пряме, вузьке завширшки до 2 м. На цій ділянці, хоч ухил великий, проте водотік маловодний. Тут виявляється динаміка уламків, по яких рухається потік, які час від часу зносяться потоком нижче за течією. Також зміни відбуваються у зв'язку

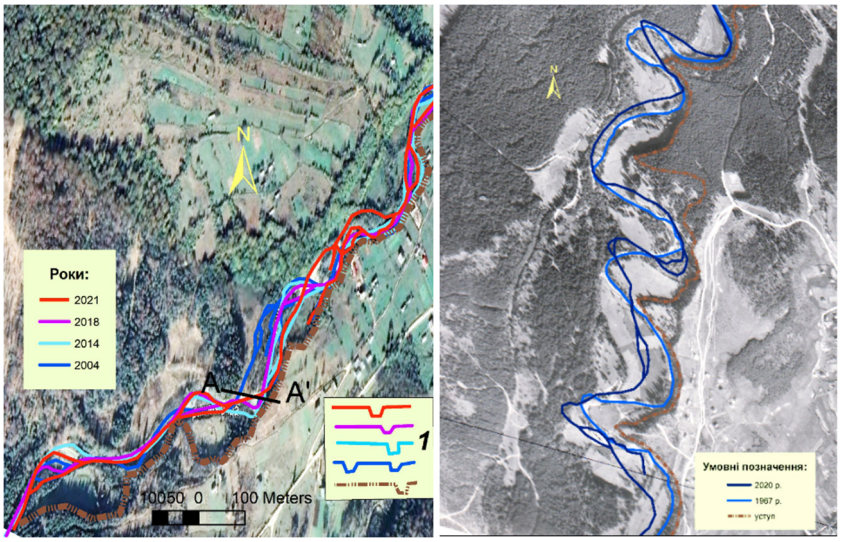
з антропогенним втручанням, пов'язаним з інтенсивними рубками лісів за останні 15 років (прокладання колій лісовозами обабіч русла і стікання води по цих коліях, замулення русла внаслідок площинних змивів із вирубок).

2) *Друга верхня гірська* ділянка (між відрогами хребтів Аршиця і Сехліс): з'являється нешироката у 30–40 м одностороння заплава; ухил 27,4 м/км; ширина русла зростає до 5–6 м, воно злегка звивисте. Морфодинаміка русла проявляється у зміщенні вигинів вниз за течією або зміною їхніх параметрів.

3) *Середня гірська* ділянка *у звуженнях* долини: заплава обмежена з двох боків крутими високими уступами, часто одностороння завширшки до 20 м або відсутня; ухил 12 м/с; ширина русла 6–8 м, воно пряме або злегка звивисте. Відбувається зміщення русла у днищі, зміни місць його врізання у берегові уступи.

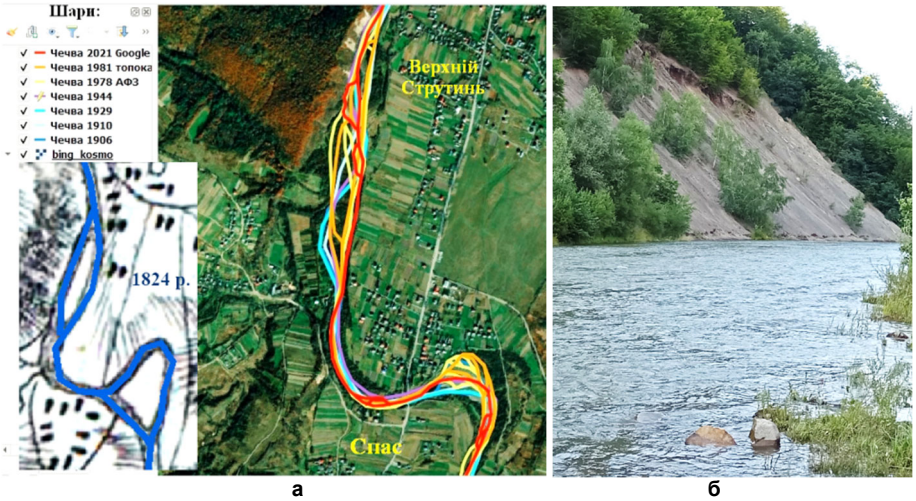
4) *Середня гірська* ділянка *в улоговиноподібних розширеннях*: заплава з одного боку обмежена прямовисним уступом першої надзаплавної тераси заввишки 5–7 м або схилом хребта, одно- і двостороння, ширина 50–60 м; ухил у середньому 10 м/км; ширина русла 10–12 м; переважають врізані меандри, іноді роздвоєння русла на два рукави. Морфодинаміка виявляється у змінах вершин і кутах розвороту меандр, зміщенні вигинів вниз за течією, спрямлення і нарощання вигинів, динаміці рукавів, невеликих змінах руслових форм – островів та боковиків (рис. 6).

5) *Нижня гірська* ділянка: заплава одно- і двостороння шириною до 100 м; ухил 5,7 м/км; ширина русла 20 м; швидкість течії 2,7–3,0 м/с (за даними гідропоста с. Спас). Морфодинаміка виявляється у змінах русла з дворукавного на однорукавне і навпаки, появі та зникненні руслових форм, зміщенні русла від одного до другого берега і навпаки (рис. 7).



а б

Рис. 6. Різночасова динаміка русла Чечви в улоговиноподібних розширеннях долини:
а) південніше с. Липовиця (основа – космознімок Google Earth 2021 р., виконано на платформі Google Earth Pro). Пунктиром показано уступ давнього врізу русла; А–А' – лінія поперечного профілю;
1 – схематичне відображення змін положення русла у днищі за відповідні роки вздовж лінії А–А';
б) північніше с. Липовиця (основа – аерофотознімок 1967 р., на який нанесено русло 2020 р. Виконано в QGIS)



а б

Рис. 7. Русло Чечви на нижньому гірському відрізку:
а – динаміка русла протягом майже 200-річного періоду;
б – порожисте русло з горизонтально залеглими верствами порід біля масиву г. Сокіл у місці відслонення "Чечвинських туфів"

6) *Верхня передкарпатська* ділянка: заплава двостороння ширина 220–250 м; ухил 3,7 м/км; русло 25–35 м. За 100-річний період спостережень відбулася така морфодинаміка: міграція русла у заплаві, ускладнення русла від однорукавного до багаторукавного, спрощення – від дворукавного до однорукавного, зміщення вигинів вниз за течією, розвернення вершин меандр на 180° від одного до другого берега.

7) *Нижня передгірська* ділянка: заплава двостороння, з відрізками звужень до 150–200 м та розширень до 400–500 м; ухил 4,9 м/км; ширина русла недалеко гирла 40 м. Широка заплава у сотні метрів створює передумови для виразної руслової морфодинаміки, яка полягає у поперечному і поздовжньому зміщенні русла, зокрема: змінах ширини та довжини поясу меандрування, наростанні і вирівнюванні вигинів, зміщенні їх вниз за течією, розверненні вигинів від одного берега до іншого, змінах форм і кутів розвороту меандр, динаміці кількості рукавів, намиванні і розмиванні руслових форм, а також міграції гирла (рис. 8).

Дискусія і висновки

Підсумовуючи вищесказане, виділяємо види геолого-геоморфологічних факторів, які подіяли на морфодинаміку русла малої річки, якою є Чечва, ліва притока Лімниці (рис. 9). З геологічних факторів найбільше вплинули літологічний склад порід, зокрема: наявність флішових відкладів у гірській та пухких у передгірській частинах долини, гранулометричний склад порід, їхня шарувата текстура, значна тріщинуватість, скісне залягання верств щодо русла та значна кількість відслонень на берегах. З геоморфологічних факторів суттєвими стали морфометрія басейну з великими перепадами висот та густим і глибоким розчленуванням, розлогі форми поперечного профілю долини, зміни ухилу і падіння річки, параметри заплави, русла і потоку. Ступінь розвитку сучасних екзогенних процесів у басейні має ритмічний вплив, посилюючись у періоди водопіль чи інших великих природних явищ та послаблюючись у спокійні періоди.

Під впливом здебільшого геолого-геоморфологічних, а також кліматичних, гідрологічних, біотичних, антропогенних факторів у багаточасовому вимірі розвинулися зміни положення і морфології русла. Вони полягали у поперечному або поздовжньому його зміщенні відносно заплави на певних відрізках. Поперечні зміщення – це міграції русла від одного берега до другого із зміною його прямої форми на звивисту та меандровану і, навпаки, з меандрованої на пряму, а також розвернення випуклості вигинів на 180° від одного берега до другого, зміни ширини поясу меандрування загалом та параметрів окремих меандр. Поздовжні зміщення – це ті, які відбувалися в напрямку ухилу дна річки. Вони полягали у змінах довжини поясу меандрування, морфологічних типів меандр (сегментні → петлеподібні → синусоїдальні), зміщення форм вигинів і руслових форм вниз за течією. Спектр змін у передгірській частині басейну ширший, ніж у гірській, у якій проявляються здебільшого лише поперечні зміщення.

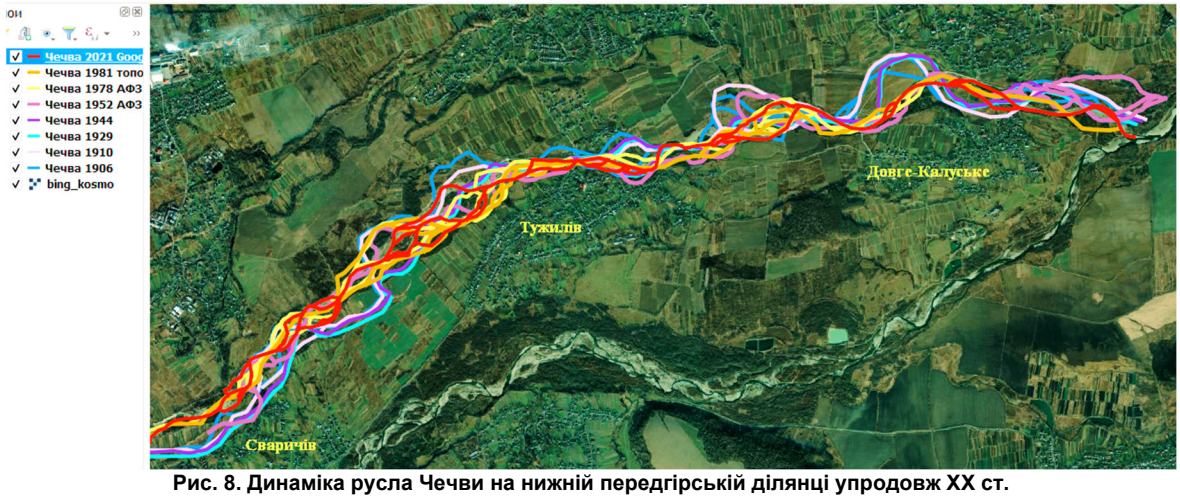


Рис. 8. Динаміка русла Чечви на нижній передгірській ділянці упродовж XX ст. і в наш час (основа – космознімок з ресурсу Bing, виконано в QGIS)

Рис. 9. Структура геологічних і геоморфологічних чинників, які визначають морфодинаміку русла малої річки

Геолого-геоморфологічні фактори виявилися як спонукальними, так і обмежувальними чинниками морфодинаміки русел малих річок. Геологічні фактори відповідають за надходження, наявність, склад, потужність, величину і форму уламків порід, що складають дно, береги русла та заплаву. Від кількості наносів і переважального пухкого їхнього складу залежить форма русла, яка неодноразово змінюється після екстремальних паводків. Це спонукальний чинник морфодинаміки річки. Обмежувальними чинниками є наявність міцних порід на берегах, які унеможливлюють розмиви; масивна текстура порід, слабка тріщинуватість, що впливають на надходження матеріалу. Геоморфологічні фактори характеризують гіпсометричне положення річки, морфологію долини, її ухил, морфометрію заплави, напрям і швидкість течії. Спонукальними чинниками при цьому стають широка заплава, низинність берегів, зміна ухилу з крутого на пологий, значна швидкість течії. Обмежувальні чинники – це відсутність заплави, урвисті береги, а також круте падіння, яке зумовлює пряме русло і малу можливість до його зміни.

Малі річки сильно вразливі до дії геолого-геоморфологічних факторів, оскільки мають невелику довжину і площу водозбору та, відповідно, водність. Водність зростає під час екстремальних паводків і саме тоді відбуваються зміни морфології русла. Для проявів динаміки малих річок достатньо незначного збільшення наносів, зміни ухилу з крутого на пологий і широкої заплави. Все це повинно враховуватися під час господарського, і, зокрема, рекреаційного освоєння долин малих річок, будівництва на них гребель та інших інженерно-технічних споруд.

Список використаних джерел

Байрак, Г. (2016). Зміни русел рік в контексті змін лісистості їхніх басейнів (на прикладі р. Підбуж Старосамбірського району). *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 6, 18–31. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/01/02-Bajrak.pdf

Байрак, Г. Р. (2011). Сучасні руслові процеси і динаміка русла р. Тиси на ділянці перетину Вигорлат-Гутинського вулканічного пасма. *Фізична географія та геоморфологія*, 62, 45–54. http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/fgtg/fgtg_2011_62.pdf

Байрак, Г. Р. (2012). Різночасові та сучасні дослідження активності руслових процесів на Верхньобескидській ділянці Дністра. *Фізична географія та геоморфологія*, 66, 216–225. http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/fgtg/fgtg_2012_66.pdf

Байрак, Г. Р., & Муха, І. С. (2015). Дослідження ерозійно-акумулятивних процесів рік Українських Карпат на основі ГІС та авторського програмного модуля. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*, 21, 13–18. https://goik.univer.kharkov.ua/wp-content/files/issue_21/21_2.pdf

Байрак, Г., & Ковальчук, У. (2017). Морфологія і динаміка русла Стривігора на Передкарпатській височині. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 7, 64–76. https://doi.org/10.30970/gpc.2017.07.1962

Бурштинська, Х. В., Третяк, С., & Галочкін, М. (2017). Дослідження горизонтальних зміщень русла річки Дністер з використанням даних ДЗЗ та ГІС-технологій. *Геодинаміка*, 2(23), 14–24. https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.014

Бухін, М. Н., Кафтан, О. Н., & Базилевич, В. А. (1974). Основні типи рік Українських Карпат. *Меліорація і водне господарство*, 29, 74–84.

Горішний, П. (2014). Горизонтальні деформації нижньої течії русла р. Стрий у 1896-2006 рр. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 4, 68–74. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/05/Horishnyy-Horyz-deform.pdf

Державна геологічна карта України масштабу 1:200 000. (2007). Аркуш M-35-XXV (Івано-Франківськ). Карпатська серія. Пояснювальна записка. УкрДГРІ.

Кафтан, О. І. (1983). *Дослідження основних руслоформувальних факторів річок Українських Карпат* [Автореф. дис. канд. геогр. наук, Львівський національний університет ім. І. Франка].

Кравчук, Я. (2021). *Рельєф Українських Карпат*. ЛНУ імені Івана Франка.

Ободовський, О. Г. (Ред.). (2012). *Латориця: гідрологія, гідроморфологія, руслові процеси*. Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".

Ободовський, О. Г., Онищук, В. В., & Гребінь, В. В. (2010). *Руслові процеси річки Лімниця*. Ніка-Центр.

Ободовський, Ю. О., Хільчевський, В. К., & Ободовський, О. Г. (2018). *Гідроморфоекологічна оцінка руслових процесів річок верхньої частини басейну Тиси (в межах України)*. Прінт сервіс.

Паланичко, О. В. (2023). Вивчення умов руслоформування річок Передкарпаття в межах алювіальних рівнин. *Проблеми геоморфології і палеогеографії Українських Карпат і прилеглих територій: збірник наукових праць*, 15, 48–65. https://doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3947

Пилипович, О. В., & Ковальчук, І. П. (2017). *Геоекологія річково-басейнової системи верхнього Дністра*. ЛНУ ім. Івана Франка.

Радзій, І., Заяць, І., & Третяк, С. (2018). Дослідження зміщень русла ріки Дністер засобами ГІС-технологій. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, II(36), 106–113. https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/edf61aa3-4001-427f-bb9f-fa699ebee89f/content

Сельський, В., & Ковальська, Л. (2007). Природно-історичний аспект формування русла р. Бистриця. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: географія*, 2, 26–30. http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/25008

Тектонічна карта Українських Карпат. (1986). Масштаб 1:200 000. Ред. В. В. Глушко, С. С. Круглов. Український науково-дослідний геологорозвідувальний інститут.

Штогрин, О. Д. (1963). *Підземні води четвертинних відкладів Передкарпаття*. АН УРСР.

Ющенко, Ю. С. (2005). *Геогідроморфологічні закономірності розвитку русел*. Рута.

Burshtynska, K., Bubniak, I., Zayats, I., Blazhko, S., & Hrytskiv, N. (2024). The influence of geological structures on the character of the channels of right-bank tributaries of the Dniester River. *Geodynamics*, 1(36), 12–26. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.012

Krzemień, K. (2012). *Struktura koryt rzek i potoków (studium metodyczne)*. Uniwersytet Jagielloński.

Krzemień, K. (Ed.). (1999). *River channels – pattern, structure and dynamics*. (Prace geograficzne, Fascicle 104). Institute of Geography of the Jagellonian University.

Raczkowska, Z. (1983). Types of stream channels in the Chochotowska Drainage Basin (the Polish Western Tatra Mts.). *Studia Geomorph., Carp.-Balc.*, 16.

Rybak, N., & Dubis, L. (2021). Horizontal deformations of the Sukil riverbed within the Pre-carpathian height in 1880–2019. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1(12), 197–211. http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2021.1.3464

Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. John Wiley & Sons.

References

Bayrak, G. (2016). Changes in river channels in the context of changes in forest cover of their basins (on the example of the Pidbuzh River, Starosambir district, Lviv region). *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpathians and Adjacent Territories: Collection of Scientific Papers*, 6, 18–31. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/01/02-Bajrak.pdf

Bayrak, G. R. (2011). Modern channel processes and channel dynamics of the Tysa River in the section of crossing the Vygorlat-Hutyn volcanic ridge. *Physical Geography and Geomorphology*, 62, 45–54. http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/fgtg/fgtg_2011_62.pdf

Bayrak, G. R. (2012). Multitemporal and modern studies of the activity of channel processes in the Upper Beskyd section of the Dniester River. *Physical Geography and Geomorphology*, 66, 216–225. http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/host/viking/db/ftp/univ/fgtg/fgtg_2012_66.pdf

Bayrak, G. R., & Mukha, I. S. (2015). Research of erosion-accumulative processes of the rivers of the Ukrainian Carpathians based on GIS technologies and the author's program module. *Problems of Continuous Geographical Education and Cartography*, 21, 13–18. https://goik.univer.kharkov.ua/wp-content/files/issue_21/21_2.pdf

Bayrak, G., & Kovalchuk, U. (2017). Morphology and dynamics of channel Stryvigor River on the pre-Carpathian Highway. *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpathians and Adjacent Territories: Collection of Scientific Papers*, 7, 64–76. https://doi.org/10.30970/gpc.2017.07.1962

Bukhin, M. N., Kaftan, O. N., & Bazylevych, V. A. (1974). The main types of rivers in the Ukrainian Carpathians. *Melioration and Water Management*, 29, 74–84.

Burshtynska, K., Bubniak, I., Zayats, I., Blazhko, S., & Hrytskiv, N. (2024). The influence of geological structures on the character of the channels of right-bank tributaries of the Dniester River. *Geodynamics*, 1(36), 12–26. https://doi.org/10.23939/jgd2024.01.012

Burshtynska, Kh. V., Tretiak, S., & Halochkin, M. (2017). Research of horizontal displacements of the Dniester River channel using remote sensing data and GIS technologies. *Geodynamics*, 2(23), 14–24. https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.014

Horishnyy, P. (2014). Horizontal deformations of the lower course of the Stryi River channel in 1896-2006. *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpathians and Adjacent Territories: Collection of Scientific Papers*, 4, 68–74. https://geography.lnu.edu.ua/wp-content/uploads/2017/05/Horishnyy-Horyz-deform.pdf

Kaftan, O. I. (1983). *Investigation of the main channel-forming factors of the rivers of the Ukrainian Carpathians* [Abstract of the dissertation of the candidate of geographical sciences, Lviv National University named after I. Franko].

Kravchuk, Ya. (2021). *Relief of the Ukrainian Carpathians*. LNU named after Ivan Franko.

Krzemień, K. (2012). *Struktura koryt rzek i potoków (studium metodyczne)*. Uniwersytet Jagielloński.

Krzemień, K. (Ed.). (1999). *River channels – pattern, structure and dynamics*. (Prace geograficzne, Fascicle 104). Institute of Geography of the Jagellonian University.

Obodovskyi, O. H. (Ed.). (2012). *Latorytsia: hydrology, hydromorphology, channel processes.* Publishing and Printing Center "Kyiv University".

Obodovskyi, O. H., Onyshchuk, V. V., & Hrebin, V. V. (2010). *Channel processes of the Limnytsia River*. Nika-Center.

Obodovskyi, Yu. O., Khilchevskyi, V. K., & Obodovskyi, O. H. (2018). *Hydromorphoecological assessment of channel processes of the rivers of the upper part of the Tysa basin (within Ukraine)*. Print service.

Palanychko, O. V. (2023). Studying the conditions of channel formation of the rivers of the Precarpathians within the alluvial plains. *Problems of Geomorphology and Paleogeography of the Ukrainian Carpathians and Adjacent Territories: Collection of Scientific Papers*, 15, 48–65. https://doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3947

Pylypovych, O. V., & Kovalchuk, I. P. (2017). *Geoecology of the river-basin system of the upper Dniester*. LNU named after Ivan Franko.

Raczkowska, Z. (1983). Types of stream channels in the Chochotowska Drainage Basin (the Polish Western Tatra Mts.). *Studia Geomorph., Carp.-Balc.*, *16*.

Radziy, I., Zayats, I., & Tretiak, S. (2018). Research of displacements of the Dniester River channel by means of GIS technologies. *Modern Achievements of Geodetic Science and Production*, II(36), 106–113. https://ena.lpnu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/edf61aa3-4001-427f-bb9f-fa699ebee89f/content

Rybak, N., & Dubis, L. (2021). Horizontal deformations of the Sukil riverbed within the Pre-carpathian height in 1880–2019. *Problems of geomorphology and paleogeography of the Ukrainian Carpathians and adjacent territories: collection of scientific papers*, 1(12), 197–211. http://dx.doi.org/10.30970/gpc.2021.1.3464

Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. John Wiley & Sons.

Selskyi, V., & Kovalska, L. (2007). Natural and historical aspect of the formation of the Bystrytsia River channel. *Scientific Notes of Ternopil National Pedagogical University. Series: Geography*, 2, 26–30. http://dspace.tnpu.edu.ua/handle/123456789/25008

Shtohryn, O. D. (1963). *Groundwaters of the Quaternary deposits of the Precarpathians*. AN URSR.

State Geological Map of Ukraine at a scale of 1:200 000. (2007). Sheet M-35-XXV (Ivano-Frankivsk). Carpathian series. Explanatory note. UkrDGRI.

Tectonic map of the Ukrainian Carpathians. (1986). Scale 1:200 000. Ed. V. V. Hlushko, S. S. Kruglov. Ukrainian Scientific Research Geological Exploration Institute.

Yushchenko, Yu. S. (2005). *Geohydromorphological regularities of channel development*. Ruta.

Отримано редакцією журналу / Received: 23.12.24
Прорецензовано / Revised: 08.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Galyna BAYRAK, PhD (Geogr.)
ORCID ID: 0000-0002-4802-2706
e-mail: halyna.bayrak@lnu.edu.ua
Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL FACTORS OF THE SMALL RIVERS MORPHODYNAMICS (ON THE EXAMPLE OF THE CHECHVA RIVER, LIMNITSA TRIBUTARIES)

Background. ***Small rivers are an important element in the structure of the earth's surface; they take an active part in the formation of its morphological outlines. They also perform an important function in the development of medium and large rivers, influence the implementation of a general nature-preserving strategy for the use of water resources in a certain region. The problem of studying the state and changes of small rivers, as well as the factors that cause changes, is multifaceted and requires thorough research. Small rivers are most dependent on geological and geomorphological factors, so it is important to study their influence on channel changes.***

Methods. ***Topographic maps of 1906, 1910, 1927, 1944, 1981, aerial photographs of 1952, 1967, 1978, and space photographs of 2005–2024 were used to study the morphodynamics of the Chechva River. Geocoding and channel digitization were performed in QGIS. A special interactive module was developed to analyze the distribution of erosion and accumulation processes along the longitudinal profile of the river in the MS Visual Studio software package. Cartographic and field studies were used to identify the characteristics of the influence of geological and geomorphological factors on the morphodynamics of the channel.***

Results. ***The morphodynamics of the Chechva River (a left tributary of the Limnytsia) was studied based on the analysis of materials from different periods. It was manifested by transverse and longitudinal displacements of the riverbed both in the mountainous part and in the foothills. Transverse shifts of the channel, changes in the tops of meanders, and changes in the number of branches took place in the mountainous part. The spectrum of changes was wider in the foothills: the migration of the channel with a change in its straight form to winding and meandering and from meandering to straight, reversal of the convexity by 180°, changes in the width and length of the meandering zone, the dynamics of morphological types and meanders parameters. The geological factors that caused the channel changes are: the lithological composition of the rocks, in particular, the presence of flysch deposits in the mountain and loose material in the foothill's parts of the Chechva valley, the granulometric composition of the rocks, their layered texture, significant fissures and a large number of outcrops on the banks. Geomorphological factors are essential: the morphometry of the basin with large height differences and dense and deep dismemberment, extensive forms of the transverse valley profile, changes in the slope and river fall, floodplain and channel parameters.***

Conclusions. ***Geological and geomorphological factors have both a motivating and a limiting influence on the morphodynamics of small river channels.***

Keywords: ***morphodynamics, modern fluvial processes, channel dynamics, small rivers, geological factors, geomorphological factors, Ukrainian Carpathians.***

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.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.382.3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02

Олександр МЕНЬШОВ[1], д-р геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Лідія ГОРОШКОВА[2], д-р екон. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-7142-4308
e-mail: goroshkova69@gmail.com

Олександр ГОЛУБ[2], д-р хім. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-1823-2523
e-mail: agolub@ukma.edu.ua

Станіслав ГОРОШКОВ[1], студент
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165
e-mail: stas20055008@gmail.com

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]Національний університет "Києво-Могилянська академія"

МАГНІТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДОННИХ ВІДКЛАДІВ ТА ГРУНТІВ ЯК ІНСТРУМЕНТ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ГЕОДИНАМІЧНИХ ЕКЗОГЕННИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРИКЛАДІ ЗАПОВІДНИКА ХОРТИЦЯ

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

В с т у п . *Під час військових дій території з різними типами землекористування зазнають значного негативного впливу. Природні та антропогенні комплекси природно-заповідного фонду острова Хортиця перебувають під постійною загрозою ракетних ударів, атак дронів, керованих авіабомб тощо. Додатковий тиск створює урбанізоване середовище та важка промисловість Запоріжжя. Окрім цього, зникнення Каховського водосховища спричинило незворотні зміни у біорізноманітті, водному режимі та ландшафтних умовах прилеглих територій, зокрема острова Хортиця. Метою даної статті є оцінка змін природних і антропогенних комплексів заповідника Хортиця шляхом аналізу магнітних властивостей та визначення концентрації небезпечних хімічних сполук, зокрема важких металів, у донних відкладеннях осушених озер, що виникли після руйнування Каховської греблі, а також у ґрунтовому покриві.*

М е т о д и . *Магнітну сприйнятливість вимірювали за допомогою лабораторного капамістка KLY-2 Kappabridge. Питома магнітна сприйнятливість (χ) визначалася шляхом нормалізації на масу. Вміст хімічних елементів аналізували за допомогою рентгенофлуоресцентного (XRF) аналізу, використовуючи обладнання компанії Elvatech.*

Р е з у л ь т а т и . *Проведено дослідження донних відкладень озер Кам'яне, Прогній, Рисове та Піщане, а також ґрунтового покриву лісової ділянки. Виявлено високу магнітну сприйнятливість. У більшості точок спостереження зафіксовано досить високі значення $\chi = 50–100 \times 10^{-8}$ м³/кг, тоді як окремі зразки демонструють ще вищі показники ($\chi = 100–300 \times 10^{-8}$ м³/кг). Такі значення можуть бути пов'язані як із техногенним забрудненням, так і з літогенним походженням магнітних мінералів, що надходять із виходів кристалічного фундаменту в околицях Хортиці. Крім того, підвищену магнітну сприйнятливість зафіксовано у піщаних ґрунтах змішаного лісу. Значущу кореляцію магнітної сприйнятливості виявлено лише для хрому (коефіцієнт кореляції – 0,4). Водночас встановлено перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) важких металів: свинцю у 2–8 разів, цинку у 2–10 разів, хрому у 20–50 разів, міді у 10–20 разів, нікелю у 5–20 разів, кобальту у 5–8 разів.*

В и с н о в к и . *Магнітна сприйнятливість донних відкладів озер та ґрунтового покриву острова Хортиця є високою. Припускається, що це пов'язано з накопиченням літогенного матеріалу від вивітрювання гірських порід кристалічного фундаменту. Концентрація низки елементів, в першу чергу важких металів, перевищує ГДК у 2–50 разів. Однак значущий коефіцієнт кореляції зафіксовано лише між χ та Cr (0,4). Отже, магнітні мінерали не мають генетичного зв'язку з матеріалами, які вміщують важкі метали. Тобто скоріше за все техногенний вплив відсутній.*

К л ю ч о в і с л о в а : *донні відклади, ґрунти, важкі метали, забруднення, магнітна сприйнятливість.*

Вступ

В умовах військових дій території з різними типами землекористування зазнають значних негативних впливів, а в окремих випадках і незворотних змін (Bonchkovskyi et al., 2025; Horoshkova et al., 2024; Menshov et al., 2024). Природні та штучні комплекси природно-заповідного фонду о. Хортиця (рис. 1) перебувають у зоні постійних обстрілів ракетами, дронами, керованими авіабомбами тощо. Додатковий вплив має урбанізоване середовище та важка промисловість Запоріжжя. Крім того, зникнення Каховського водосховища спричинило незворотні зміни у біорізноманітті, водному режимі та ландшафтних умовах прилеглих територій, зокрема і Хортиці.

Забруднення, природно-техногенні зміни, лісові пожежі, зокрема спричинені падінням уламків бойових частин дронів і ракет, а також осушення територій відображаються у фізико-хімічних властивостях ґрунтів, донних відкладів і прибережних гірських порід (пісків, супісків, уламків гірських порід). Ідентифікація цих змін здійснюється за допомогою комбінації геофізичних методів, зокрема швидкісних та економічно доступних магнітних вимірювань. Аналіз даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у середовищі геоінформаційних систем (ГІС) дають змогу створити просторові моделі забруднення, а подальші лабораторні дослідження хімічного складу матеріалів, особливо у зонах суттєвих аномалій, забезпечують детальну оцінку екологічного стану території.

Вимірювання магнітної сприйнятливості є простим і швидким методом, який дає надійне уявлення про ступінь забруднення важкими металами донних відкладів (Devanesan et al., 2020). Зміни магнітних властивостей осадів в озерних системах зазвичай пояснюються діяльністю людини у відповідних водозбірних басейнах, але зв'язок між магнетизмом осадів і інтенсивністю людської діяльності, як правило, погано встановлений, що обмежує використання магнітного методу в палеоекологічних

© Меньшов Олександр, Горошкова Лідія, Голуб Олександр, Горошков Станіслав, 2025

реконструкціях (Yang et al., 2025). Магнітні властивості донних відкладів контролюються алохтонними і автохтонними магнітними частинками і відрізняються залежно від розташування в басейні озер (Lascu, & Plank, 2013). У берегових відкладеннях переважають уламкові магнітні частинки, тоді як літоральні відкладення характеризуються поєднанням бактеріальних магнітосом і уламкових частинок. Положення киснево-безкисневої межі розділу, яка може відбуватися у воді або всередині товщі осаду, контролює глибину, на якій живуть магнітотактичні бактерії, і визначає ступінь збереження їх ланцюгів магнітосом у поверхневих осадах (Chaparro et al., 2017) відзначають, що аналіз даних озерних донних відкладень Аноніма свідчить про те, що основний поверхневий потік, розташований на південний захід від досліджуваного озера, контролює надходження уламків і просторову зміну складу осадів.

Рис. 1. Об'єкти дослідження донних відкладів у межах заповідника Хортиця

За допомогою комплексного аналізу (магнітні параметри, рентгенівська дифракція та інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є) у цих озерних відкладеннях було ідентифіковано мінерали магнетиту та грейгіту. Такі феримагнітні мінерали мають наддрібні розміри зерен (<0,1 мкм). Магнітні параметри та немагнітні величини, проаналізовані за допомогою багатофакторної статистики, виявляють значні відмінності між муловою фацією (χ=109,6×10^{-8} м^3/кг) і піщаною фацією (χ=82,1×10^{-8} м^3/кг). Отже, в озері Аноніма ідентифіковано та охарактеризовано чотири субсередовища осадження. Такий аналіз сприяє розумінню сучасних озерних динамічних та осадових процесів. Систематичне дослідження магнітної сприйнятливості та вмісту

важких металів осадів озера Лугу на південному заході Китаю (Wang et al., 2018) вказують на існування кореляційного зв'язку (за Пірсоном) з концентраціями важких металів (Al, Ti, Fe, Cr, Ni, Cu, Zn і Cd), а також з комплексним індексом забруднення Томлінсона (PLI). Отже, наявні істотні зв'язки джерел осадження та міграції між магнітними частинками та важкими металами. Значущі коефіцієнти кореляції між магнітними параметрами, важкими металами та PLI вказують на те, що магнітні параметри потенційно можна використовувати як індекс забруднення важкими металами озерних відкладень. Дослідження (Szczepaniak-Wnuk et al., 2020) виявило два можливих джерела забруднення у донних відкладах промислового регіону: транспортні потоки та викиди теплоелектростанцій. Не можна виключити вплив додаткового джерела забруднення, оскільки кількість сферул в осадових відкладеннях у центрі водойми була надзвичайно високою. Це дослідження демонструє, що магнітометрія має практичне застосування для виявлення та картографування забруднення важкими металами у водних системах. Крім того, результати (Kusza et al., 2023) стосуються просторового розподілу магнітної сприйнятливості та вмісту потенційно токсичних елементів (PTE) у поверхневому шарі донних відкладень у гирлі Вісли (Гданська затока, Польща). Вміст PTE та магнітна сприйнятливість відкладень показали дуже високу неоднорідність у межах досліджуваної території, залежно від розташування, гранулометричного складу та вмісту органічної речовини. Аналіз магнітної сприйнятливості є простим та ефективним методом, який можна використовувати для доповнення ідентифікації техногенних змін у водному середовищі.

Таким чином, метою даної статті є оцінка зміни природних та штучних комплексів заповідника Хортиця шляхом аналізу магнітних властивостей та визначення вмісту небезпечних хімічних сполук (зокрема, важких металів) у донних відкладеннях осушених озер, що утворилися після підриву Каховської греблі, а також ґрунтовому покриві. В подальшому кластеризація всіх видових ділянок острова (лісів, луків, прибережних зон, техногенних територій та гідрологічних об'єктів) за магнітними та іншими фізико-хімічними показниками ґрунтів дасть змогу визначити масштаби та характер змін екосистеми.

Методи

Острів Хортиця (рис. 1) в межах м. Запоріжжя є найбільшим островом долини Дніпра (довжина 11,2 км, ширина 2,4 км). Розташовується у Степовій агрокліматичній зоні України в підзоні різнотравно-типчаково-ковильних степів із теплим сухим континентальним кліматом. Геологічною основою служить південний край Українського кристалічного щита, докембрійські породи віком близько 2,5 млрд років, передусім граніти, покриті шаром більш молодих осадових порід. У північній частині острова Хортиця над берегом піднімаються скелі, висота яких сягає 40–50 м, що спадають до півдня (Маринич, Пащенко, & Шищенко, 1985). У рельєфі панують долинно-балкові і заплавні форми. Основними ґрунтотвірними породами, крім гранітів, служать лес та алювіальні піски, на яких формуються звичайні чорноземи, дернові, лугові і болотні ґрунти (Дубова, 2008). Характерною особливістю ґрунтів о. Хортиця є їх еродованість. Розвитку ерозії сприяє зимове промерзання ґрунтів, режим весняного сніготанення, літні зливи, значна довжина та крутість схилів, давність сільськогосподарського освоєння території, низька протиерозійна стійкість верхніх горизонтів ґрунтів. У межах Хортиці розташовані вісім великих озер: Безім'яне, Кам'яне, Прогной, Домаха, Осокорове, Головківське, Підкручне, Річище. Всі озера плавневої частини Хортиці мають вигляд простягнутих у меридіональному напрямку (за течією Дніпра) видовжених водойм різної величини. У східній частині Хортицьких плавнів їх 4, у західній – 12. Жодне з них не з'єднується з Дніпром. Крім того, є багато боліт, які або мають у плані форму невеликих озер, або (особливо у західній частині) прилягають до більших озер чи оточують дрібніші. Ми дослідили донні відклади озер Кам'яне, Прогній, Рисове та Піщане (рис. 1). Після підриву Каховського водосховища всі озера висохли. Відбір проб проводився з осушеного дна. Також було вивчено ґрунтовий покрив території у межах змішаного лісу. Загальний вигляд досліджуваних донних відкладів та ґрунтів наведено на рис. 2.

Вимірювання магнітної сприйнятливості проводили за допомогою лабораторного капамістка KLY-2 Kappabridge. Питому магнітну сприйнятливість (χ) визначено шляхом нормалізації до маси. Вміст елементів досліджено за допомогою XRF аналізу на апаратурі компанії Elvatech.

Результати

Результати розподілу значень магнітної сприйнятливості всієї колекції донних відкладів та ґрунтів о. Хортиця наведено на рис. 2. Магнітна сприйнятливість висока. Зазвичай для самих магнітних ґрунтів України вона не перевищує 100×10^{-8} м^3/кг (Menshov, & Sukhorada, 2012). У нашому випадку досить високі значення $\chi=50–100\times10^{-8}$ м^3/кг зафіксовано для більшості точок спостереження. У той же час частина колекції характеризується більш екстремально високими значеннями ($\chi=100–300\times10^{-8}$ м^3/кг), що більше характерне або за наявності техногенного забруднення, або при літогенному генезисі детритових магнітних мінералів в осадах, що привносяться з виходів в околиці Хортиці кристалічного фундаменту. Крім того, високі значення магнітної сприйнятливості зафіксовано для піщаних ґрунтів змішаного лісу. Таким чином, для досліджених зразків донних відкладів висохлих озер та ґрунтів можна зробити припущення про формування високих значень магнітної сприйнятливості за рахунок привнесення техногенних магнітних частинок від роботи промисловості м. Запоріжжя протягом довгого періоду часу (десятки і сотні років). Друга гіпотеза полягає у привнесенні високомагнітної фракції (магнетит) із кристалічного фундаменту, який є поруч та зазнавав впливу вивітрювання.

Наступним кроком став елементний аналіз зразків, результати якого наведено в табл. 1. Зафіксовано перевищення ГДК для свинцю у 2–8 разів, цинку у 2–10 разів, хрому в 20–50 разів, міді у 10–20 разів, нікелю в 5–20 разів, кобальту у 5–8 разів. Слід зауважити, що методологічно для осадів необхідно застосовувати інші ГДК, ніж для ґрунтів. Тобто зауважені перевищення можна вважати як орієнтовні. Гістограму розподілу вмісту Cr наведено на рис. 4. Найвищі значення зафіксовано для озера Рисове (300–500 мг/кг). Хоч одночасно і мінімальні значення зафіксовано для цього об'єкта (близько 20 мг/кг). Найбільш імовірні значення лежать у діапазоні 100–200 мг/кг і характерні для озер Прогній, Піщане, Кам'яне та ґрунтів лісової зони. Наведені дані можуть свідчити про доволі хаотичне накопичення матеріалу в донних відкладах та ґрунтах, що містять у своєму складі наведені елементи та магнітні мінерали.

Для наведених вмістів елементів значущий коефіцієнт кореляції із магнітною сприйнятливістю отримано лише для Cr (рис. 5). Він склав 0,4, що є значущим для даної вибірки згідно з (Fisher, & Frank, 1948).

Рис. 2. Загальний вигляд досліджуваних донних відкладів та ґрунтів заповідника Хортиця:
а – типовий вигляд висушеного озера, б – відклади о. Рисове, в – відклади о. Прогній, г – лісові ґрунти, які зазнали впливу пожежі

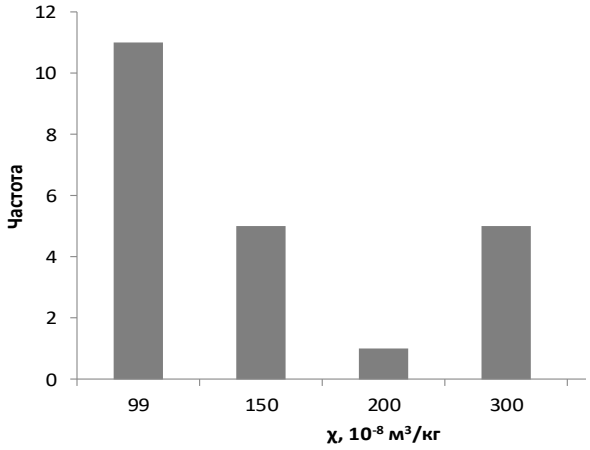


Рис. 3. Гістограма розподілу значень магнітної сприйнятливості

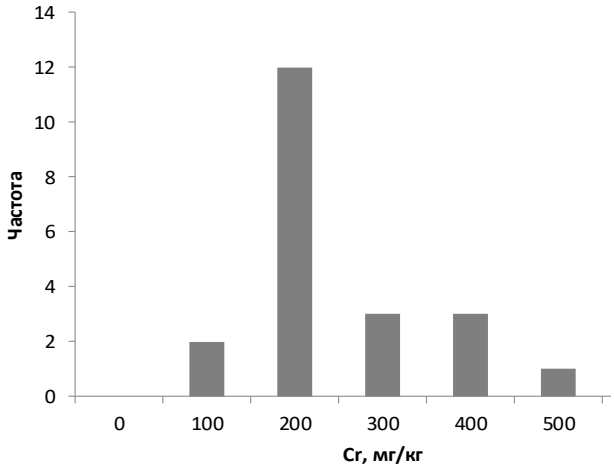


Рис. 4. Гістограма розподілу вмісту Cr у зразках

ISSN 1728-3817

Таблиця 1

Магнітна сприйнятливість та вміст деяких елементів у донних відкладах та ґрунтах заповідника Хортиця

Зразок*	χ	Pb	Zn	Cr	Fe	Cu	Ni	Co
*ГДК для ґрунтів***		*32*	*23*	*6*		*3*	*4*	*5*
Рисове 1 верх	58	116	302	338	87214	98	91	45
Рисове 2	230	121	566	307	96073	116	147	48
Рисове 3	271	122	701	392	110033	199	160	54
Рисове 4	250	219	1151	525	169910	205	270	85
Рисове (2) 1 верх	98	223	276	408	141629	190	172	70
Рисове (2) 2	18	136	127	21	82570	79	99	44
Рисове (2) 3	71	101	136	18	68105	58	81	38
Прогній 1	92	6	330	144	88299	36	92	45
Прогній 2	90	73	327	175	98118	37	185	51
Прогній 3	103	50	288	143	75189	38	83	41
Прогній верх	73	54	159	145	71004	38	62	36
Прогній середина	179	88	257	237	98080	67	97	46
Прогній 21 см низ	122	90	251	277	96171	65	97	47
Кам'яне 1	83	47	216	158	52373	73	53	40
Кам'яне 2	86	46	194	149	48229	72	48	36
Кам'яне 3	108	35	142	108	36276	49	43	29
Піщане 1	102	65	168	159	72950	52	64	47
Піщане 2	113	32	64	145	40380	23	28	27
Піщане 3	91	36	51	135	35920	20	25	26
Ліс 1	97	10	36	104	13067	4	18	14
Ліс 2	208	27	98	166	26408	11	40	21
Ліс 3	572	17	59	216	26159	9	24	20

* Розмірність χ, 10^{-8} м^3/кг; елементи, мг/кг

** ГДК наведено для ґрунтів відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325 "Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин" для рухомих форм, а заи відсутності даних щодо рухомої форми – використано валову.

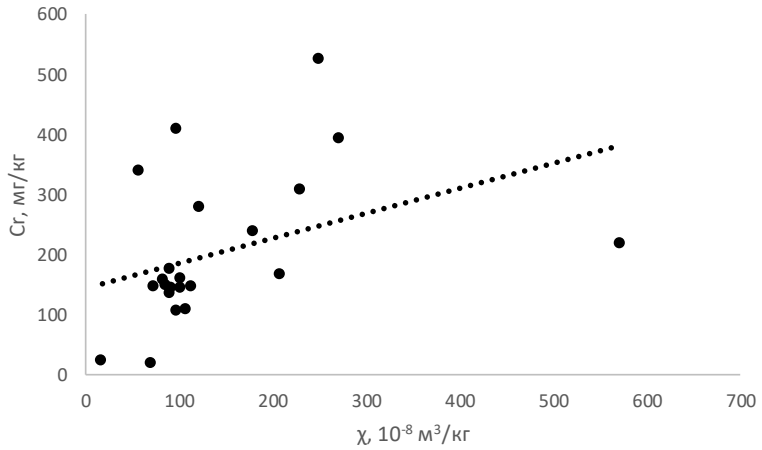


Рис. 5. Кореляційна залежність між χ та вмістом Cr

Дискусія і висновки

Таким чином, значення магнітної сприйнятливості як для донних відкладів, так і для ґрунтів є високими (χ=100–300×10^{-8} м^3/кг). Вони перевищують відомі показники для чорноземів типових і звичайних, які є автоморфними регіональними ґрунтами для Запорізької області, у 1–5 разів. У той же час піщані ґрунти острова Хортиця порівняно з такими же ґрунтами борових терас України є більш магнітними у 10–20 разів (Menshov, & Sukhorada, 2012). Отже, першою гіпотезою була наявність техногенного забруднення Запоріжжя та навколишньої урбанізованої території (Bondar et al., 2024). В даній роботі проаналізовано промислові пилові викиди від найпотужніших джерел забруднення повітря Запоріжжя. Виділено два типи магнітних промислових викидів, що впливають на намагнічення міських ґрунтів: поширення крупнозернистих частинок, що містять магнетит, обмежується промисловою зоною, тоді як дрібніші магнітні сферули осідають на значній відстані від джерел забруднення, приносячи у ґрунт значні кількості важких металів. Магнітна сприйнятливість, залишкова намагніченість насичення та ідеальна намагніченість ґрунтів демонструють сильний взаємозв'язок із вмістом важких металів та індексом забруднення PLI. Згідно з низкою публікацій (Ghobadi, Khoramnejadian, & Alipour, 2024; Delbecque et al., 2022; Menshov et al., 2021), в яких розглянуто зв'язки між магнітними параметрами та вмістом важких металів – має фіксуватися кореляційний та генетичний зв'язок між χ та свинцем, міддю, цинком, хромом і т. ін. У нашому випадку зафіксовано лише коефіцієнт кореляції 0,4 між магнітною сприйнятливістю і хромом (див. рис. 5). Для решти наведених у табл. 1 елементів такий зв'язок прямує до нуля. У той же час магнітна сприйнятливість висока, що більше характерно для суттєво забруднених урбаноземів (Liu et al., 2016). Водночас фіксується і підвищений вміст важких металів (якщо брати до уваги ГДК для ґрунтів). За даними китайських авторів, при χ≤71×10^{-8} м^3/кг ґрунт вважається

незабрудненим; 71×10^{-8} м^3/кг<$\chi\leq162\times10^{-8}$ м^3/кг ґрунт є слабозабрудненим; 162×10^{-8} м^3/кг<$\chi\leq253\times10^{-8}$ м^3/кг – помірне забруднення, а $\chi\geq253\times10^{-8}$ м^3/кг відповідає сильнозабрудненим ґрунтам. Беручи до уваги окреслене вище, очевидним стає припущення про інший генезис магнітних мінералів у ґрунтах та елементного складу, який не пов'язує генетично ці параметри. Скоріше за все це накопичення в донних осадах озер, а також піщаному ґрунтовому покриві лісових ділянок заповідника Хортиця привнесених частинок від вивітрювання гірських порід кристалічного фундаменту, який оточує острів (Єнтін та ін., 2023). Мова йде про Середньопридніпровський тектонічний блок Українського щита в межах Дніпропетровської і Запорізької областей, який складений ґранітогнейсами, метабазитами, сланцями та залізистими породами. Наприклад, деякі геологічні утворення Українського щита можуть характеризуватися підвищеним вмістом двооксиду титану (TiO_2), заліза (Fe_2O_3) та зниженим вмістом кремнезему (SiO_2), магнітна сприйнятливість яких може досягати 5000×10^{-5} од. СІ. Зауважимо, що магнітні частинки скоріше за все є саме літогенного походження з домінуванням магнетиту. У наших подальших дослідженнях заплановано проведення магнітомінералогічного аналізу з метою з'ясування конкретних магнітних мінералів, їх розмірів та доменного стану.

Подяки, джерела фінансування: Дослідження виконувалися за проєктом 0124U004208 "Еколого-економічна оптимізація логістичної інфраструктури в умовах війни та повоєнного відновлення України", що реалізується у рамках програми наукових робіт, науково-технічних та інфраструктурних проєктів, які фінансуються за кошти спеціального фонду, отриманих за рахунок зовнішнього інструменту допомоги Європейського Союзу для виконання зобов'язань України у Рамковій програмі Європейського Союзу з наукових досліджень та інновацій "Горизонт 2020".

Внесок авторів: Олександр Меньшов – концептуалізація, ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Лідія Горошкова – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Олександр Голуб – методологія, валідація та аналіз даних; Станіслав Горошков – вимірювання та обробка даних.

Список використаних джерел

Дубова, О.В. (2008). Еколого-агрохімічна оцінка та фізичні властивості ґрунтів заплавневої зони острова Хортиця. *Вісник ЗНУ. Біологія,* 2, 53–59.

Єнтін, В.А., Гінтов, О.Б., Орлюк, М.І., & Марченко, А.В. (2023). Локальні магнітні аномалії Українського щита як індикатори прояву різновікових етапів осередково-канального магматизму. *Геофизический журнал,* 45(2), 44–62.

Маринич, А.М., Пащенко, В.М., & Шищенко, П.Г. (1985). *Природа Украинской ССР. Ландшафты и физико–географическое районирование*, Наук. думка.

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment,* 964, 178594.

Bondar, K. M., Tsiupa, I. V., Sachko, A. V., & Nasiedkin, I. I. (2024). Pre-war situation with soil pollution in the city of Zaporizhzhia: Metallurgical industry center in Ukraine – Characterized by magnetic, geochemical and microscopy methods. *Acta Geophysica,* 72(2), 1355–1375.

Chaparro, M. A., Chaparro, M. A., Córdoba, F. E., Lecomte, K. L., Gargiulo, J. D., Barrios, A. M., ... & Böhnel, H. N. (2017). Sedimentary analysis and magnetic properties of Lake Anónima, Vega Island. *Antarctic Science,* 29(5), 429–444.

Delbecque, N., Van Ranst, E., Dondeyne, S., Mouazen, A. M., Vermeir, P., & Verdoodt, A. (2022). Geochemical fingerprinting and magnetic susceptibility to unravel the heterogeneous composition of urban soils. *Science of the Total Environment,* 847, 157502.

Devanesan, E., Chandrasekaran, A., Sivakumar, S., Freny Joy, K. M., Najam, L. A., & Ravisankar, R. (2020). Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution detection in sediment. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science,* 44, 875–888.

Fisher R.A., & Frank Y. (1948). *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*, 6th ed., published by Longman Group, Ltd., London.

Ghobadi, F., Khoramnejadian, S., & Alipour, S. (2024). Correlation of soil magnetic susceptibility with heavy metals and physico-chemical profile. *Journal of Environmental Engineering and Science, 19*(4), 255–261.

Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK,* 31(6), 10–26. https://doi.org/10.32317/ekon.apk/6.2024.10

Kusza, G., Kubowicz, A., Kłostowska, Ż., Łuczak, K., Łęczyński, L., & Hulisz, P. (2023). Environmental effects of potentially toxic elements and the magnetic susceptibility distribution in the surface bottom sediments in the Vistula estuary (Gulf of Gdańsk, Poland). *Journal of Soils and Sediments,* 23(9), 3499–3512.

Lascu, I., & Plank, C. (2013). A new dimension to sediment magnetism: Charting the spatial variability of magnetic properties across lake basins. *Global and Planetary Change,* 110, 340–349.

Liu, D., Ma, J., Sun, Y., & Li, Y. (2016). Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China. *Catena,* 139, 53–60.

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University,* 1.

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. In *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenigy, Ukraine. *Earth Systems and Environment,* 5(3), 739–750. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7

Szczepaniak-Wnuk, I., Górka-Kostrubiec, B., Dytłow, S., Szwarczewski, P., Kwapuliński, P., & Karasiński, J. (2020). Assessment of heavy metal pollution in Vistula river (Poland) sediments by using magnetic methods. *Environmental Science and Pollution Research,* 27, 24129–24144.

Wang, L., Hu, S., Ma, M., Wang, X., Wang, Q., Zhang, Z., & Shen, J. (2018). Responses of magnetic properties to heavy metal pollution recorded by lacustrine sediments from the Lugu Lake, Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research,* 25, 26527–26538.

Yang, W., Fu, H., Zhang, Y., & Ouyang, T. (2025). Sediment magnetic records of human activities in Lake Chaohu Basin over the past 166 years. *Anthropocene*, 100468.

References

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment,* 964, 178594.

Bondar, K. M., Tsiupa, I. V., Sachko, A. V., & Nasiedkin, I. I. (2024). Pre-war situation with soil pollution in the city of Zaporizhzhia: Metallurgical industry center in Ukraine – Characterized by magnetic, geochemical and microscopy methods. *Acta Geophysica,* 72(2), 1355–1375.

Chaparro, M. A., Chaparro, M. A., Córdoba, F. E., Lecomte, K. L., Gargiulo, J. D., Barrios, A. M., ... & Böhnel, H. N. (2017). Sedimentary analysis and magnetic properties of Lake Anónima, Vega Island. *Antarctic Science,* 29(5), 429–444.

Delbecque, N., Van Ranst, E., Dondeyne, S., Mouazen, A. M., Vermeir, P., & Verdoodt, A. (2022). Geochemical fingerprinting and magnetic susceptibility to unravel the heterogeneous composition of urban soils. *Science of the Total Environment,* 847, 157502.

Devanesan, E., Chandrasekaran, A., Sivakumar, S., Freny Joy, K. M., Najam, L. A., & Ravisankar, R. (2020). Magnetic susceptibility as proxy for heavy metal pollution detection in sediment. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science,* 44, 875–888.

Dubova, O. V. (2008). Ecological-agrochemical assessment and physical properties of soils in the floodplain zone of Khortytsia Island. *Bulletin of ZNU. Biology,* 2, 53–59.

Fisher R.A., & Frank Y. (1948). *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research, 6th ed.* Longman Group, Ltd., London.

Ghobadi, F., Khoramnejadian, S., & Alipour, S. (2024). Correlation of soil magnetic susceptibility with heavy metals and physico-chemical profile. *Journal of Environmental Engineering and Science,* 19(4), 255–261.

Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK,* 31(6), 10–26. https://doi.org/10.32317/ekon.apk/6.2024.10

Kusza, G., Kubowicz, A., Kłostowska, Ż., Łuczak, K., Łęczyński, L., & Hulisz, P. (2023). Environmental effects of potentially toxic elements and the magnetic susceptibility distribution in the surface bottom sediments in the Vistula estuary (Gulf of Gdańsk, Poland). *Journal of Soils and Sediments,* 23(9), 3499–3512.

Lascu, I., & Plank, C. (2013). A new dimension to sediment magnetism: Charting the spatial variability of magnetic properties across lake basins. *Global and Planetary Change,* 110, 340–349.

Liu, D., Ma, J., Sun, Y., & Li, Y. (2016). Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China. *Catena,* 139, 53–60.

Marynych, A. M., Pashchenko, V. M., & Shyshchenko, P. G. (1985). *Nature of the Ukrainian SSR. Landscapes and physical-geographical zoning*. Naukova Dumka.

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University,* 1.

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. In *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenigy, Ukraine. *Earth Systems and Environment,* 5(3), 739–750. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7

Szczepaniak-Wnuk, I., Górka-Kostrubiec, B., Dytłow, S., Szwarczewski, P., Kwapuliński, P., & Karasiński, J. (2020). Assessment of heavy metal pollution in Vistula river (Poland) sediments by using magnetic methods. *Environmental Science and Pollution Research,* 27, 24129–24144.

Wang, L., Hu, S., Ma, M., Wang, X., Wang, Q., Zhang, Z., & Shen, J. (2018). Responses of magnetic properties to heavy metal pollution recorded by lacustrine sediments from the Lugu Lake, Southwest China. *Environmental Science and Pollution Research,* 25, 26527–26538.

Yang, W., Fu, H., Zhang, Y., & Ouyang, T. (2025). Sediment magnetic records of human activities in Lake Chaohu Basin over the past 166 years. *Anthropocene,* 100468.

Yentin, V. A., Hintov, O. B., Orlyuk, M. I., & Marchenko, A. V. (2023). Local magnetic anomalies of the Ukrainian Shield as indicators of different-age stages of focal-channel magmatism. *Geophysical Journal,* 45(2), 44–62.

Отримано редакцією журналу / Received: 14.12.24
Прорецензовано / Revised: 15.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Oleksandr MENSHOV[1], DSc (Geol.), Senior Researcher,
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Lidiia HOROSHKOVA[2], DSc (Econom.), Prof.,
ORCID ID: 0000-0002-7142-4308
e-mail: goroshkova69@gmail.com

Alexander GOLUB[2], DSc (Chem.), Prof.,
ORCID ID: 0000-0003-1823-2523
e-mail: agolub@ukma.edu.ua

Stanislav HOROSHKOV[1], Student
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165
e-mail: stas20055008@gmail.com

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]National University of Kyiv Mohyla Academy

MAGNETIC STUDIES OF SEDIMENTS AND SOILS AS A TOOL FOR DETECTION OF DANGEROUS GEODYNAMIC EXOGENIC PROCESSES ON THE EXAMPLE OF THE KHORTYSYA RESERVE

Background. During the military activity, areas with different types of land use experience significant negative impacts. The natural and anthropogenic complexes of the Khortytsia Nature Reserve are under constant threat from missile strikes, drone attacks, guided aerial bombs, and other forms of military activity. Additional pressure is exerted by the urban environment and heavy industry of Zaporizhzhia. Moreover, the disappearance of the Kakhovka Reservoir has led to irreversible changes in biodiversity, water regimes, and landscape conditions in the surrounding areas, including Khortytsia Island. The aim of this study is to assess the changes in the natural and anthropogenic complexes of the Khortytsia Reserve by analyzing magnetic properties and determining the concentrations of hazardous chemical compounds, particularly heavy metals, in the bottom sediments of dried-up lakes formed after the destruction of the Kakhovka Dam, as well as in the soil.

Methods. Magnetic susceptibility was measured using a laboratory KLY-2 Kappabridge. Mass-specific magnetic susceptibility (χ) was determined by normalization to mass. The content of chemical elements was analyzed by X-ray fluorescence (XRF) analysis using Elvatech equipment.

Results. The study considers the bottom sediments of Lake Kamyane, Prohniy, Rysove, and Pishchane, as well as the soil of the forested area. High magnetic susceptibility was detected. Most observation points recorded relatively high values of χ=50–100×10^{-8} m^3/kg, while some samples exhibited even more extreme values (χ=100–300×10^{-8} m^3/kg). These elevated values may be associated with either anthropogenic pollution or the lithogenic origin of magnetic minerals transported from crystalline basement outcrops in the vicinity of Khortytsia. Additionally, increased magnetic susceptibility was observed in the sandy soils of the mixed forest. A significant correlation with magnetic susceptibility was found only for chromium (correlation coefficient is 0.4). At the same time, exceedances of the maximum allowable concentrations of heavy metals were recorded: lead by 2–8 times, zinc by 2–10 times, chromium by 20–50 times, copper by 10–20 times, nickel by 5–20 times, and cobalt by 5–8 times.

Conclusions. The magnetic susceptibility of the bottom sediments of lakes and the soil of Khortytsia Island is high. It is assumed that this is due to the accumulation of lithogenic material from the weathering of crystalline basement rocks. The concentration of a number of elements, primarily heavy metals, exceeds the MPC by 2–50 times. However, a significant correlation coefficient was recorded only between χ and Cr (0.4). Therefore, magnetic minerals do not have a genetic connection with materials containing heavy metals. That is, most likely there is no anthropogenic impact.

Keywords: sediments, soil, heavy metals, pollution, magnetic susceptibility.

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.

UDC 550.552.53.553
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.03

Ivan KARPENKO, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0001-7753-9010
e-mail: karpenko.i.geoscience@gmail.com
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and
Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine; NJSC "Naftogaz of Ukraine"

Anastasiia CHUPRYNA, PhD (Earth Sc.)
ORCID ID: 0000-0001-9857-3533
e-mail: chuprinan14@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

Oleksii KARPENKO, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5780-0418
e-mail: okarpenko@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

THERMAL MATURITY OF DEVONIAN ROCKS IN TERMS OF THEIR LITHOLOGICAL-FACIES AND AGE AFFILIATION. NORTHERN AND SOUTHERN SIDES OF THE DNIPRO-DONETS BASIN

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

Background. *The production of hydrocarbons (HC) in open fields is decreasing, and the fields that were discovered in recent years, as a rule, are small in terms of reserves and can no longer provide a resource base for its expansion. An analysis of the experience of leading oil and gas companies shows that a significant expansion of the resource base and the discovery of significant reserves of hydrocarbon deposits can be obtained through the use of modern exploration technologies, which actively use in their arsenal the modeling of hydrocarbon systems in the studied territories. Carboniferous and Upper Devonian deposits remain the most promising stratigraphic complexes for the search for new deposits of explosives within the Eastern region of Ukraine.*

Methods. *Mathematical statistics methods were used to create model constructions that allowed meaningful analysis of the original geological and geochemical information. The initial data were the results of laboratory studies by the pyrolysis method (Rock-Eval) of rock samples from search and exploration wells of the southern and northern sides of the Dnipro-Donets basin (DDB). In terms of lithology, the core samples were argillites (shales) – the vast majority, siltstones, sandstones, and limestones.*

Results. *An important result of this study is that the feature of the spatial distribution of the main parameters of kerogen organic matter has been established, depending on the depth of the Devonian oil and gas source rocks, their age, as well as the location of the wells from which the core was taken, on the Northern or Southern sides of the DDB. Using the methods of mathematical statistics on the basis of cluster analysis, the classification of rock samples with a clay composition relative to the prevailing type of organic matter was performed based on the data of laboratory studies on the Rock-Eval apparatus.*

Conclusions. *Quite high concentrations of organic matter in a significant number of studied samples (mainly in shales and limestones) were found at different depths, which are primarily corrected by the age of the Upper Devonian deposits. The regularities of changes in Tmax – the temperature of the maximum yield of hydrocarbons during kerogen cracking, depending on the depth of the location of rocks, which are distinct on the Southern and Northern sides of the DDB, have been established. This indicates different paleotectonic activity of the specified structural-tectonic elements in the post-Devonian period. On the South side, clay formations with a high kerogen content and high Tmax values are hypsometrically higher than on the Northern side of the Dnipro-Donets depression.*

Keywords: *Devonian, kerogen, pyrolysis, cluster analysis, hydrocarbons, Dnipro-Donets basin.*

Background

The study of the kerogen distribution in the Upper Devonian stratum of the Dnipro-Donets basin is important for understanding the geological structure and evolution of the sedimentary basin in the context of the reproduction of the hydrocarbon system, as well as for assessing their oil and gas potential. Kerogen, as the main source of hydrocarbons, is an important object in the process of basin analysis. The study of its quantitative and qualitative composition, as well as the features of its spatial distribution, makes it possible to increase the reliability of forecasts regarding the prospects of individual zones within the Dnipro-Donets basin. This is especially relevant for the onshore slope parts of the Dnipro-Donets depression, which for a long time has been one of the key areas of oil and gas exploration, including directly in Devonian deposits.

Highlighting previously unresolved parts of the overall problem

If we consider this article as a source of information with certain meaningful conclusions, then the research results below can be considered to be a certain addition to those already existing published data regarding the study of Upper Devonian deposits of the Dnipro-Donets basin, as a geological environment with existing oil and gas petroleum source rock. Due to the small number of prospecting and exploratory wells that revealed Devonian deposits, all representative collections of core material from such sections are extremely interesting in various geological aspects.

In the period 1980–2000, *interest in research on Devonian sediments* in oil and gas prospects within the Dnipro-Donets basin was *disengaged*. This was due to the negative results of drilling and testing, which did not meet the initial expectations for oil and gas deposits in the Devonian layers. However, poor oil and gas deposits were found in several areas, such as Yadutivska and Kinashivska. Therefore, the ultimate futility of Devonian deposits was not proven, and scientific research continued, albeit on a smaller scale.

Scientists Arsiriy and Kabyshev analyzed the difference of oil and gas potential between the Devonian deposits in the DDB and the Pripyat Trough. They concluded that the conditions for the formation and accumulation of oil and gas in these regions are different, and the prospects in the northwest of the DDB are worse. However, this does not indicate that this segment is completely hopeless. Researchers continue to consider Famennian as promising intersalt deposits, and Frasnian subsalt – less important. From a structural point of view, more attention is paid to the peripheral zones of large depressions and the slopes of the basement protrusions, while the basement uplifts are considered less promising (Stryzhak, & Korzhnev, 2012).

© Karpenko Ivan, Chupryna Anastasiia, Karpenko Oleksii, 2025

ISSN 1728-3817

To evaluate the prospects of Devonian deposits, it is necessary to comprehensively assess the condition of all components of the hydrocarbon system. As you know, even the absence of one component or the conditionality of its parameters is enough to give up further studies regarding the assessment of oil and gas capacity and the presence of significant accumulations of hydrocarbons.

Many researchers were engaged in the study of the oil and gas source component system in the Dnipro-Donets basin. Rocks with a high content of organic matter were studied in detail. This mainly concerned the Carboniferous deposits, to a much lesser extent – the Devonian deposits of the depression (Lukin, 2006; Menning[1] et al., 2006; Menning[2] et al., 2006; Sachsenhofer et al., 2018; Stryzhak, & Korzhnev, 2012).

The most characterized by the core and the most studied is the upper part of the Devonian deposits within the Dnipro-Donets basin. However, the geochemical study of the deposits in relation to the oil and gas generation potential is insufficient and fragmented in the literature. For example, we can cite the monograph (Mykhailov et al., 2014), in which the structural and stratigraphic features of Devonian deposits are described in particular, as well as data on estimates of the thermal maturity of rocks (by the reflectivity of vitrinite), the content of organic carbon from mainly clayey parts of well sections in individual areas and deposits are given.

Therefore, additional new geochemical data on other areas from Devonian terrigenous sections are extremely important in terms of studying oil and gas formation with the aim of searching for new oil and gas deposits in the region.

Geological and geochemical features of the research objects

Special feature of the studied Upper Devonian deposits is primarily the presence of layers with a high or increased content of organic matter, which will potentially serve as a source of hydrocarbon generation. This fact is sufficiently described in the special literature, and we have every right to use the main theses and provisions regarding Devonian deposits, thanks to which the formation of deposits in the Devonian and post-Devonian times took place in the past.

Regarding the stratigraphic and spatial position of individual layers, strata and horizons of the Famennian and Frasnian layers of the Upper Devonian, one can refer to their concise description from the monograph (Mykhailov et al., 2014): "..Devonian deposits, as a rule, do not go beyond the edge faults, being located within the graben. In their composition, subsalt, lower salt, intersalt, upper salt and suprasalt complexes are often distinguished." The subsalt complex of the Frasnian layer is composed mainly of terrigenous rocks, in the upper part of the section they are replaced by limestones, dolomites and shales. It is noted that in the northwestern part of the depression, the Semyluk deposits of the Frasnian layers are composed of dark gray bituminous limestones, dolomites with interlayers of shales, bearing marks *of Domanicoid* sedimentation. It should be noted that volcanogenic conglomerates and tuff sandstones are sometimes found everywhere. The lower salt complex is represented by the Yevlanivsky and Livensky horizons. They lie transgressively on the sediments of the Voronezh horizon. Their lower part is composed of layering of rock salt, limestones, marls, anhydrites, sandstones, siltstones and tuffites. The upper one is completely composed of saline deposits (Mykhailov et al., 2014). The intersalt complex of the Famennian layer is the Zadonsky and Yeletsky horizons. They lie unconformably on the Evlanivsky-Livensky sediments. Composed of gray-colored rocks – shales, siltstones, sandstones with subordinate lenses of limestones, effusives and pyroclastic formations. Mudstones and siltstones predominate in the central parts of the depression, and sandstones dominate in the coastal areas (Mykhailov et al., 2014; Mykhailov, & Karpenko, 2020). The suprasalt complex of the Famennian stage corresponds to the upper part of the Dankovo-Lebedyan Formation. It is composed in the lower part of gray sandstones, siltstones and shales.

Within the northwestern part of the Dnipro-Donets basin, only three small deposits of heavy oil have been discovered in the Devonian sediments – Bakhmatske, Kholmske and Tvanske. Also, recovorable oil potential has been established on Yadutivske (Northern pre-board zone), and recovorable gas potential – on Petrovska Square (Southern pre-board zone) (Mykhailov et al., 2014).

Rock samples from the deposits of the Famennian and Frasnian levels were taken from wells, which can be divided into two groups according to their geographical location: belonging to the Northern and Southern subzones. Tab. 1–3 characterize the general distribution of samples by lithology, stratigraphic affiliation and location of wells. Statistical characteristics refer to the total organic carbon content (TOC) in rocks.

Table 1

Statistics characteristics of the total organic carbon content (TOC, %) in the rocks of the main lithotypes

Lithology	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Shale	90	2,65	0,81	17,18	2,51
Limestone	16	1,46	0,31	3,39	0,90
Siltstone	2	1,58	1,58	1,58	0
Shale+limestone	2	2,77	2,77	2,77	0
Metasomatitis	2	1,05	1,05	1,05	0
Sandstone+shale	8	1,77	1,17	2,9	0,7
Sandstone	4	8,18	1,92	14,44	7,2

Table 2

Statistics characteristics of the total organic carbon content (TOC, %) in the rocks of the Devonian stratigraphic subdivisions

Stratigraphy	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
D_3fm_2	10	5,97	1,02	17,18	6,58
D_3f_2	28	2,81	0,67	14,44	3,41
D_3fm_1	70	2,20	1,02	3,96	0,73
D_3fm_3	6	2,70	2,47	2,87	0,19
D_3f_3	2	1,05	1,05	1,05	0,00
D_3f_1	8	1,12	0,31	1,69	0,63

Table 3

Statistics characteristics of the total organic carbon content (TOC, %) in Devonian rocks depending on the location of the investigated layers of rocks

Placement	Geography	Valid N	Mean	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Over salt	Northwestern board zone	6	9,24	2,1	17,18	6,77
Under salt	Northwestern board zone	18	1,60	0,31	3,39	0,89
Between salt	Northwestern board zone	70	2,20	1,02	3,96	0,73
Over salt	Southern board zone	10	2,05	1,02	2,87	0,86
Under salt	Southern board zone	18	3,27	0,67	14,44	4,17

Fig. 1 shows an example of a typical shale from a collection of rock samples from the Famennian layer of the studied deposits. It should be noted that all clay rocks contain transformed organic material of varying degrees of preservation. Lithology of the sample: siltstone's shale. The structure is silt-pelitic, the texture is disordered. The rock is composed of hydromica, muscovite, biotite, admixture of the silt fraction is 10 %, paleontological fossils occupy 10 %, replaced by calcite, sometimes by silica. The fossils are represented by algal detritus and undiagnosed remains. The rock is sprinkled with pyrite, an interlayer enriched with pyrite secretions is observed.

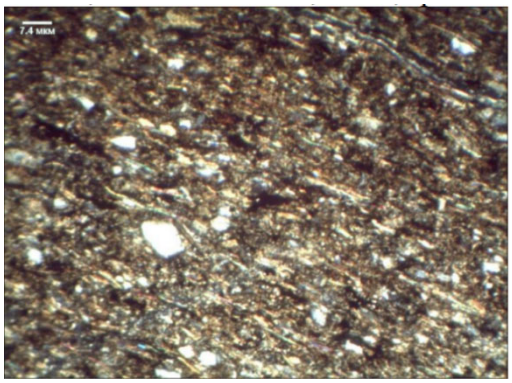


Fig. 1. Photomicrograph of siltstone's shale from a depth of 5319-5324 m. The Famennian layer, the northern board zone of the Dnipro-Donets basin

Methods

Express methods for assessing the maturity of organic matter in sedimentary rocks often use physical and chemical indicators, which allows you to quickly and efficiently determine the stage of maturity of rocks and organic matter (OM). The main methods include (Hunt, 1979; Mack, & Engel, 1993; Peters, Walters, & Moldowan, 2005; Lupoi et al., 2017):

Rock-Eval pyrolysis (Rock-Eval): this is one of the most common methods that allows you to assess the thermal maturity of OM by pyrolysis. Indicators S_1, S_2 and *Tmax* are determined, which indicate the amount of hydrocarbons that have already formed or may be formed when the rock is heated. The parameter *Tmax* (temperature of maximum release of hydrocarbons) serves as the main indicator of thermal maturity.

Vitrinite reflectance (imprint analysis): this is a method of measuring the level of vitrinite reflectance in a rock, which is also an indicator of maturity. A vitrinite reflectance under a microscope gives an idea of the maximum temperature the rock has experienced, which correlates with the maturity of the OM.

Fluorescence of organic components: a method that uses fluorescence to determine changes in the structure of organic matter. Over time, OM loses its ability to fluoresce, which can be an indicator of maturity.

IR spectroscopy: infrared spectroscopy helps to detect changes in the functional groups of OM that depend on the degree of maturity. In particular, absorption analysis in areas characteristic of methylene groups, aromatic structures, etc. When it is carried out, the sample is irradiated with infrared light, and certain functional groups in the molecules absorb light at their characteristic wavelengths. This makes it possible to analyze which groups are present in the sample and how their concentrations change with the growth of OM maturity.

The main aspects of the method:

Absorption at different wavelengths: Changes in methylene ($–CH_2–$) and methyl ($–CH_3$) groups, as well as aromatic and oxygen-containing groups (carbonyl, carboxyl) are important for the maturity of organic matter.

Intensity of methylene and methyl band groups: an increase in intensity in the 2850–2950 cm^{-1} window, characteristic of aliphatic hydrocarbons, often indicates increased maturity.

Changes in aromatic groups: in the range of 1600 cm^{-1} the intensity of the band may indicate an increase in the content of aromatic structures, which is characteristic of more mature OM.

Ratio of band intensities: the ratio of the intensities of aromatic and aliphatic bands (for example, the ratio of intensities in the 1600 cm^{-1} and 2850 cm^{-1} windows) allows one to estimate how thermally the material has been exposed.

Gas chromatography and gas chromatographic mass spectrometric analysis: these methods allow analyzing the chemical composition of organic components, revealing hydrocarbon fractions and the ratio of biomarkers, which are indicators of OM maturity.

Gas chromatographic mass spectrometric analysis is widely used to analyze hydrocarbon fractions, especially biomarkers, which are organic molecules with a clear correlation with OM maturity. It combines gas chromatography (GChr) to separate the components of a mixture and mass spectrometry (MS) to identify and determine the structure of individual molecules.

The main aspects of the method:

Biomarker analysis: biomarkers are complex organic molecules that can store information about the chemical environment and maturation stage of the OM.

Steroids and triterpenoids: with increasing temperature and pressure, steroid and triterpenoid molecules are converted into more stable forms. The ratio of steranes to triterpenes (eg, sterane/hopane) can indicate the stage of maturity.

Isomers of hopanes and steranes: the ratio of different structural isomers, such as αβ- to ββ-hopanes, shows the degree to which organic molecules are transformed under the influence of temperature.

Distribution of n-alkanes: long-chain n-alkanes gradually disappear, and short-chain ones become dominant in the late stages of maturity. This makes it possible to estimate maturity by the distribution of hydrocarbons.

Gas chromatographic mass spectrometric analysis makes it possible to determine the stages of OM catagenesis, especially when other methods, such as Rock-Eval pyrolysis, are no longer accurate.

Each of the above methods has its advantages and limitations, and is often used in combination with others to obtain a more accurate picture of the maturity of organic matter in sedimentary rocks.

Nevertheless, pyrolysis on the device Rock-Eval is one of the most effective methods for estimating the amount and maturity of organic matter in sedimentary rocks used in geochemistry to determine hydrocarbon generation potential. This method is fast, does not require complex sample preparation, and provides valuable information on the carbon composition and thermal history of the OM.

During the analysis, the sample is gradually heated to different temperatures in two main stages:

Pyrolysis: the first stage of heating without access to air, during which organic matter is decomposed into volatile compounds, which can be hydrocarbons, CO_2 and other gases.

Oxidation: after pyrolysis, the sample residue is oxidized to measure the amount of residual organic carbon.

Detect the thermal maturity: *Tmax* parameter is a fairly reliable indicator of thermal maturity, which allows you to assess whether the rock has reached the necessary temperature to generate oil or gas.

Assessment of the generation potential: indicators S_1 and S_2 allow assessing whether the rock is promising for hydrocarbon generation, and also indicating the stage of catagenesis.

Division of types of OM: in addition to the indices *HI* and *OI*, one can determine the type of OM, for example, humus, sapropelitic or mixed origin, which is important for predicting the characteristics of possible hydrocarbons.

Evaluation of thermal history: the method allows getting an idea of the thermal history of rocks and the stage of catagenesis, which is important for the exploration of deposits.

Limitations of the Rock-Eval method. Limitations for highly mature rocks: for highly mature rocks, the method becomes less effective because the OM has undergone maximum changes and further heating does not release sufficient hydrocarbons for accurate measurements.

Difficulty in interpretation: results can be difficult to interpret in complex systems with multiple OM types or mixed thermal histories.

Due to its advantages, Rock-Eval remains the main tool in the study of thermal maturity and hydrocarbon generation potential of sedimentary rocks, allowing reliable rapid analysis of OM in the early stages of exploration.

This article is based on the results of laboratory studies of rocks from the Devonian deposits of the Northern and Southern sides of the Dnipro-Donets basin.

Results

A significant number of the figures below allow visualizing the peculiarities of the distribution of organic matter (more precisely, its indicator – TOC), parameters of OM depending on the stratigraphic affiliation and geographical location of the wells from which the rock material was taken for analysis. Only shale samples were selected for the study, which, among other lithological types of rocks, can be potential oil and gas source rocks for this type of section of the Dnipro-Donets basin.

The content of organic carbon TOC in Devonian rocks almost everywhere, regardless of age, is mostly more than 1 %, on average 2,65 % (Tab. 2, Fig. 2). That is, Devonian shales can potentially serve under certain thermal conditions as part of the hydrocarbon system – the parent rock. Anomalous values of two samples D_3fm_1 age (TOC > 8 %) correspond to black shale rocks, which are potentially (again under certain other conditions) oil- or gas shale layers, in the future – separately hydrocarbon deposits.

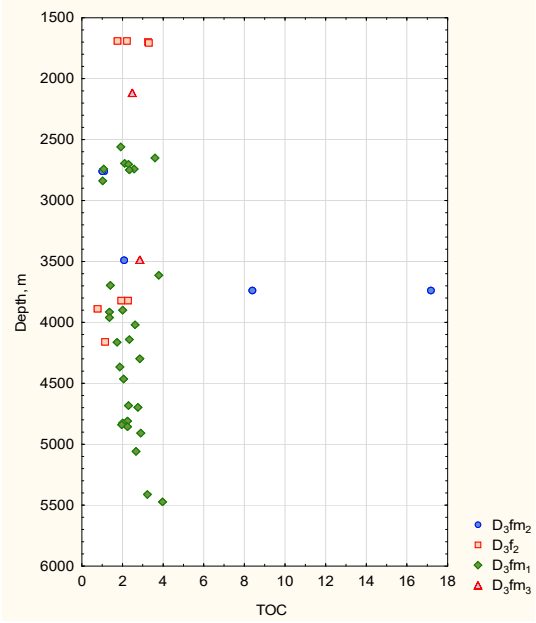


Fig. 2. Dependence of the *TOC* parameter for shales on the depth of sediments relative to Frasnian and Famennian stages

Distribution of TOC practically does not change for shales, remaining within 1–4 %.

Fig. 3 indicates the regularity of the distribution of depths of Devonian shale strata for the Southern and Northern sides of the DDB. On the Northern side, the Devonian sediments dip significantly in the well sections – in the range of 2550–5500 m, on average – 3900 m. In the South side, in the well sections, the Devonian is much higher: shales are found at depths of 1700–4200 m, on average – 2800 m. However, the distribution of the values of the indicator *(S1+S2)/TOC* almost does not change: from very low values to 80–90. 8 samples of shales of the North side have abnormally high values of generation potential – 200 or more *(S1+S2)/TOC*. The Rock-Eval studies carried out in the laboratory of the State Enterprise "Ukrnaukageotsentr" (Poltava) and their meaningful interpretation indicate the absence of mature hydrocarbons in a significant number of mudstone samples. At the same time, a group of clay rocks in the amount of 8 samples shows that the Devonian deposits are currently thermally mature, which indicates their generative potential to contribute to the formation of hydrocarbon deposits.

The considered distributions of individual parameters of shales depending on the depth of the sediments indicate fairly uniform characteristics of the rocks inherent in the Southern and Northern sides of the Dnipro-Donets basin. However, not everything is so clear-cut regarding the trends of changes in the thermal maturity of organic matter in these zones. In Fig. 4, significantly different gradients of changes in the value of *Tmax* are observed from the depth of deposits.

Constructed orthogonal regression lines clearly indicate different gradients of *Tmax* change: a significantly larger angle of inclination for the Northern part of the DDB and a smaller one in the Southern part (zone).

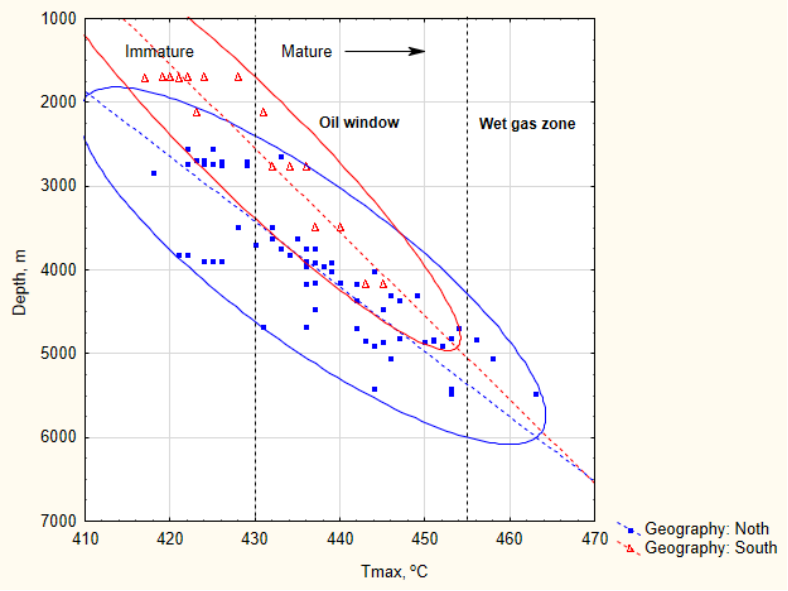


Fig. 3. Dependence of the *Tmax* parameter for shales on the depth of sediments relative to the Northern and Southern sides of the Dnipro-Donets depression

There may be several reasons for such differences:

Structure and mineral composition of rocks. Although the studied rocks are of the same age and lithological affiliation, their mineral composition may be different. Accordingly, the influence of chemically active components of the solid part (matrix) of rocks can also be different. However, this is a rather weak argument regarding the significant differences in *Tmax* values found, especially at depths less than 3500 m.

Temperature gradients. Paleotemperature gradients could vary significantly in different parts of the depression. The Southern part may have experienced more intense geothermal flow, leading to faster thermal maturity of the kerogen.

Tectonic processes in the past. Tectonic activity could affect the distribution of pressures and temperatures, which changed the conditions for maturity (Karpenko, & Tynik, 2018). For example, more significant tectonic events could have occurred in the Southern part, which created conditions for increased maturity. Here it should be noted that, most likely, tectonic processes affected the significant uplift of the territory in the post-Devonian period within the Southern Coastal Zone, which caused the removal of mudstones with sufficiently mature organic matter – kerogen to shallower depths already after their thermal heating in the Devonian period.

Also, an important factor could be *the time* during which the organic matter was under the influence of heat and pressure, which affected its maturity.

Composition and type of kerogen. Different types (composition) of the original organic material could react differently to the same paleoconditions of kerogen maturation.

Hydrogeological conditions. Mineralization and the composition of chemical compounds in formation water could affect the processes of thermal maturity.

The listed factors deserve a detailed study regarding their influence on the degree of thermal maturation of kerogen. However, it is already possible to make some assumptions based on the results of the analysis of published studies. In the paper (Ivanova, & Gavryltsev, 2021), the data of paleogeothermal reconstructions performed at the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences are given. The authors of this work determined paleogeothermal gradients, paleodepths of maximum paleotemperatures, and amplitudes of vertical movements of rock massifs over a significant part of the Dnipro-Donets depression. The analysis of cartographic constructions in the work (Ivanova, & Gavryltsev, 2021) allows us to draw conclusions about the main factors that led to significant differences between the thermal maturity of rocks at the same depths of occurrence in the Southern and Northern sides of the DDB. The value of the geothermal gradient in the late Paleozoic time was 3,3–3,5 ˚C/100m within the Northern zone of wells and 2,9–3,3 ˚C/100m within the Southern zone of wells. That is, more significant temperatures may have been in the Northern zone. However, there is a significant difference in the amplitudes of vertical movements, which are determined on the map of vertical movements of tectonic and salt dome structures in the Permian period in the article (Ivanova, & Gavryltsev, 2021). In the Northern zone, amplitudes of vertical movements corresponding to a layer of eroded rocks of less than 0,5 km have been established. At the same time, in the Southern zone within the studied wells, the thickness of eroded rocks is 1–1,5 km according to the map.

Actually, these vertical movements in the post-Devonian (mainly Permian) time caused the erosion of sedimentary deposits, which is significantly different in the Northern and Southern side zones. Therefore, a different degree of maturity of rocks and organic matter is observed at the same depths in different side zones. At a depth of approximately 3000 m (Fig. 3) in the Northern zone, organic matter has not yet reached the maturity of active generation of hydrocarbons. And at this depth in the Southern zone, the kerogen in mudstones has already reached maturity, which corresponds to the "oil window" of generation (*Tmax* more than 430 ˚C*)*. At modern sediment depths of 4,000–5,000 m in mudstones of Late Devonian age, the kerogen is sufficiently mature and in terms of *Tmax* is in the "oil window" zone, regardless of the geographical location of the wells for both zones. At the same time, at such depths, the trend of higher values of thermal maturity of organic matter in the sections of wells of the South zone still persists. At the same values of

Tmax, the depth difference in the "oil window" zone between the two zones is approximately 0,5 km. This corresponds to the difference in the values of the amplitudes of vertical movements in the Northern and Southern zones of the Dnipro-Donets basin in the areas where the wells are located.

The unclear question remains regarding the type of organic matter (kerogen) and its ability to generate a significant amount of hydrocarbons under all favorable conditions (temperature, time, pressure, hydrogeological regime, etc.). There are standard approaches that allow for the characteristics of studies obtained on Rock-Eval using Van Krevelen diagrams to obtain the most likely type of organic matter and its thermal maturity (Hunt, 1979). We made an attempt to estimate the type of organic matter in the Upper Devonian mudstones using the cluster analysis method, which refers to "classification without learning" technologies. The main parameters obtained during pyrolysis of shale samples using the Rock-Eval method were used as initial data (Tab. 4).

The optimal 4 groups (clusters) of shale rocks, which differ significantly in the complex of geochemical parameters, were chosen (Tab. 4). The highest values of the hydrogen index *are HI* and, at the same time, the lowest are the values of the oxygen index *OI* – in shales of the first group. This clearly indicates the genetic origin of organic matter, which according to the Van Krevelen diagram corresponds to kerogen types I–II (Fig. 4).

Table 4

Statistics characteristics (mean) of the geochemical parameters of the Upper Devonian mudstones organic matter for each cluster (according to the results of the cluster analysis)

Parameters	Cluster no. 1	Cluster no. 2	Cluster no. 3	Cluster no. 4
Tmax, °C	431,0	432,5	436,8	429,0
HI	208,6	60,9	21,9	52,4
OI	9,68	11,3	14,4	91,6
TPI	0,179	0,13 5	0,229	0,146
S_3/TOC	9,57	11,37	14,51	91, 8
(S_1+S_2)/TOC	262,5	70,2	28,0	60,9

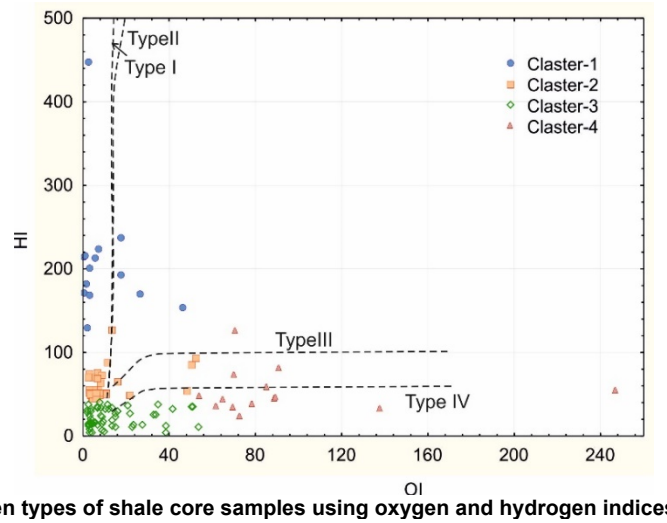


Fig. 4. Classification of kerogen types of shale core samples using oxygen and hydrogen indices from the studied wells taking into account cluster analysis grouping. Modified Van Krevelen diagram (Ratnayake, Kularathne, & Sampei, 2018)

It should be noted that the average values of the *Tmax* parameter in the clusters do not differ significantly, which indicates the classification of shales according to the data of the cluster analysis according to other parameters, which are largely related to the type of organic matter and the phase of hydrocarbon generation. The parameter *(S_1+S_2)/TOC* indicates the genetic potential or the total amount of HC that could be generated by the rock (without taking into account the migration of hydrocarbons from the rock that has already occurred). The combination of S_1+S_2 is advisable here, because differentiation by the type of hydrocarbons (liquid or gaseous) capable of generating kerogen will lead to an increase in the number of predefined classes in cluster analysis, which is inappropriate with a relatively small sample size. A significant number of shale rocks in statistical sample have a degree of thermal maturity within the "oil window" (Fig. 3) and only 3 samples in value of *Tmax* are in the wet-gas zone. The organic matter of samples belonging to clusters 3 and 4 has the lowest generation potential. This is confirmed by low values of the *(S_1+S_2)/TOC* parameter and high values of the *S_3 /TOC* parameter. In the Rock-Eval method, the S_3 parameter analysis helps estimate the amount of oxygen-containing organic components in the core sample. During the analysis, S_3 displays the amount of carbon dioxide (CO_2) released when the organic substance is heated in an inert gas atmosphere. High values *of* S_3 can indicate such characteristics of the organic matter as the type of organic matter, the high degree of oxidation of the organic matter, as well as the low potential ability to generate hydrocarbons. Type of organic matter: high values of S_3 are usually associated with humic or carbonaceous organic matter (types III and IV kerogen), rich in oxygen, which is characteristic of terrestrial vegetation, peat deposits, coal, and highly oxidized samples. A high content of oxygen-containing groups in organic matter can be a sign of oxidation or decomposition of organic matter, which is also observed in samples with kerogen types III or IV. Samples with high *S_3/TOC* generally have less oil and gas generation capacity because the oxygen-containing groups contribute to the formation of CO_2 during thermal decomposition, rather than liquid or gaseous hydrocarbons. The organic matter in the samples of cluster 2 most likely belongs to types II–III, but its potential for generating hydrocarbons is not high. The

general conclusion about the kerogen of samples in cluster 2 based on the complex of geochemical features (see Tab. 4) is as follows. Kerogen has a low residual generation potential, may be represented by type III kerogen, with limited potential for oil generation, or type II in the phase of reduced generation capacity. It is at the late stage of the oil window, or has already partially exhausted its potential for the generation of liquid hydrocarbons. This kerogen is already mature and has low residual hydrocarbon content, which limits its prospects as a source of liquid hydrocarbons.

Based on the results of the analysis, it can be stated that only a small number of samples (which belong to cluster 1) have a high potential for the generation of liquid and gaseous hydrocarbons. All others, although their generation cannot be denied, have limited opportunities to generate oil (mostly) or gas in significant volumes even at thermal maturity.

Discussion and conclusions

Analysis of pyrolysis results of 114 core samples (shales, sandy shales, calcareous shales) from the Upper Devonian deposits (Famenan and Frasnian layers) of the Northern and Southern side zones of the Dnipro-Donets Basin was performed**.** Laboratory studies were performed on pyrolytic equipment Rock-Eval. The geochemical characteristics of the rocks made it possible to draw several important conclusions.

1. Most of the core samples have already reached the thermal stage of the "oil window", but some are still in the state of "immaturity", especially at depths below 3000–2500 m.

2. A different degree of organic matter maturity of shales at the same depths in different side zones was established. At a depth of approximately 3000 m in the Northern zone, the organic matter has not yet reached the maturity of active generation of hydrocarbons (Fig. 3). And at this depth in the Southern zone, the kerogen in mudstones has already reached maturity, which corresponds to the "oil window" of generation (*Tmax* more than 430 ˚C).

3. The difference in the depth of sediments, where the boundary of kerogen maturity passes in the Southern and Northern zones of the Dnipro-Donets depression, is explained by different tectonic activity mainly in Permian time. In the Northern zone, the amplitudes of vertical movements corresponding to a thickness of eroded rocks of less than 0,5 km were calculated. At the same time, in the Southern zone within the studied wells, the thickness of eroded rocks is 1–1,5 km according to the map data (Ivanova, Gavryltsev , 2021).

4. At sediment depths of 4,000–5,000 m in mudstones of the Famennian and Fransian levels, the kerogen is sufficiently mature and in terms of *Tmax* is in the "oil window" zone, regardless of the geographical location of the wells for both zones (Fig. 3).

5. The results of the cluster analysis of geochemical parameters allowed to distinguish 4 classes of shales. Only a small number of samples 12,2 % (Class 1) host kerogen with high hydrocarbon generation capacity at this time, are thermally mature and have high hydrogen index at very low oxygen. They correspond to the 1st type of organic matter. Such a percentage is explained by the variety of facies conditions of the formation of the Upper Devonian deposits, respectively, by the different types of organic matter preserved in them.

The final conclusion regarding the potential of hydrocarbon generation, even with a limited volume of shale core sampling, can be made with a more detailed analysis of all sample parameters at Rock-Eval, lithological and petrographic studies. It is also possible to significantly expand the research on the generation potential of Devonian argillites using the results of well logging using the Q. Passey method for determining the content of organic carbon.

Authors' contribution: Ivan Karpenko – conceptualization, methodology, formal analysis, writing (original draft); Anastasiia Chupryna – data validation, writing (review and editing); Oleksii Karpenko – formal analysis, writing (review and editing).

References

Hunt, J. M. (1979). *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman and Company.

Ivanova, A. V., & Gavryltsev, V. B. (2021). Paleogeothermal and paleotectonic reconstructions based on vitrinite thermometry data (on the example of the upper paleozoic deposits of the Dnieper-Donets depression and adjacent areas of Donbass). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 82–105. [Иванова, А. В., Гаврильцев, В. Б. (2021). Палеогеотермические и палеотектонические реконструкции по данным витринитовой термометрии (на примере верхнепалеозойских отложений Днепровско-Донецкой впадины и прилегающих частей Донбасса). *Геофизический журнал*, 43(3), 82–105.] https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236382

Karpenko, O., & Tynik, O. (2018). Specification border jumping catagenetic changes rocks on examples individual deposits DDD hydrocarbons. *Scientific Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Geology*, 3(82), 29–35. [Карпенко О., Тунік О. (2018). Уточнення меж стрибкоподібних катагенетичних змін порід на прикладі окремих родовищ вуглеводнів ДДЗ. *Науковий вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Сер. Геологія*, 3(82), 29–35.]

Lukin, O. (2006). Devonian of the Dnieper-Donets avlakogen (tectonic-sedimentary complexes, formations, genetic types of deposits and lithogeodynamics). *Geological journal*, 2/3, 26–46. [Лукін, О. Ю. (2006). Девон Дніпровсько-Донецького авлакогену (тектоно-седиментаційні комплекси, формації, генетичні типи відкладів та літогеодинаміка). *Геологічний журнал*, 2/3, 26–46.]

Lupoi, J. S., Fritz, L. P., Parris, T. M., Hackley, P. C., Solotky, L., Eble, C., & Schlaegle, S. (2017). Assessment of Thermal Maturity Trends in Devonian-Mississippian Source Rocks Using Raman Spectroscopy. Limitations of Peak-Fitting Method. *Front. Energy Res.*, 5, 24. https://doi.org/10.3389/fenrg.2017.00024

Mack, S. A., & Engel, M. H. (1993). *Organic Geochemistry: Principles and Methods*. Plenum Press.

Menning, M., Alekseev, A. S., Chuvashov, B. I., Davydov, V. I., & Devuyst, X. (2006). Global time scale and regional stratigraphic reference scales of Central and West Europe, East Europe, Tethys, South China, and North America as used in the Devonian-Carboniferous-Permian Correlation Chart 2003 (DCP 2003). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240(1–2), 318–372. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.03.058

Menning, M., Alekseev, A. S., Chuvashov, B. I., Davydov, V. I., & Devuyst, X. (2006). Oil/gas-source rock correlations in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine): New insights into the petroleum system. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 720–742. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.002

Mykhaylov, V., & Karpenko, O. (2020). Prospects non-traditional oil and gas capacity Southern utility room zones Dnipro-Donetsk depressions. *Scientific Bulletin of Taras Shevchenko Kyiv National University. Geology*, 1(88), 53–60. [Михайлов, В., Карпенко, О. (2020). Перспективи нетрадиційної нафтогазоносності Південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Науковий вісник КНУ імені Тараса Шевченка. Сер. Геологія*, 1(88), 53–60.]

Mykhailov, V. A., Vakarchuk, S. G., Zeykan, O. Yu., Kasyanchuk, S. V., Kurovets, I. M., & Vyzhva, S. A. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Monograph. Book 8: Theoretical substantiation of unconventional hydrocarbon resources of sedimentary basins of Ukraine*. "Nika Center". [Михайлов, В. А., Вакарчук, С. Г., Зейкан, О. Ю., Касіянчук, С. В., Куровець, І. М., Вижва, С.А. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. 8. Теоретичне обґрунтування ресурсів нетрадиційних вуглеводнів осадових басейнів України. Ніка-центр.]

Peters, K. E., Walters, C. C., & Moldowan, J. M. (2005). *The Biomarker Guide: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History*. Cambridge University Press.

Ratnayake, A. S., Kularathne, C. W., & Sampei, Y. (2018). Assessment of hydrocarbon generation potential and thermal maturity of the offshore Mannar Basin, Sri Lanka. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8, 641–654. https://doi.org/10.1007/s13202-017-0408-1

Sachsenhofer, R., Popov, S., Coric, S., Mayer, J., Misch, D., & Morton, M. (2018). Paratethyan petroleum source rocks: an overview. *Journal of Petroleum Geology*, 41(3), 219–245. https://doi.org/10.1111/jpg.12702

Stryzhak, V. P., & Korzhnev, P. M. (2012). Peculiarities of the Devonian deposits structure and oil and gas capacity of the northwestern part of Dnieper-Donets avlakogen. *Tectonics and Stratigraphy*, 39, 43–56. [Стрижак В. П., Коржнев П. М. (2012). Особливості будови та нафтогазоносності девонських відкладів північно-західної частини Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Тектоніка і стратиграфія*, 39, 43–56.]

Отримано редакцією журналу / Received: 05.11.24
Прорецензовано / Revised: 15.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Іван КАРПЕНКО, канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0001-7753-9010
e-mail: karpenko.i.geoscience@gmail.com
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України; НАК "Нафтогаз України"

Анастасія ЧУПРИНА, PhD (Науки про Землю)
ORCID ID: 0000-0001-9857-3533
e-mail: chuprinan14@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна

Олексій КАРПЕНКО, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5780-0418
e-mail: okarpenko.geol@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна

ТЕРМІЧНА ЗРІЛІСТЬ ПОРІД ДЕВОНУ В АСПЕКТІ ЇХ ЛІТОЛОГО-ФАЦІАЛЬНОЇ І ВІКОВОЇ НАЛЕЖНОСТІ. ПІВНІЧНИЙ І ПІВДЕННИЙ БОРТИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

В с т у п . ***Видобуток вуглеводнів (ВВ) у відкритих родовищах скорочується, а родовища, відкриті останніми роками, зазвичай невеликі за запасами і вже не можуть забезпечити ресурсну базу для його нарощування. Аналіз досвіду провідних нафтогазових компаній показує, що суттєве нарощування ресурсної бази та відкриття значних за запасами родовищ ВВ можливо отримати за рахунок використання сучасних технологій пошуків, які активно використовують у своєму арсеналі моделювання вуглеводневих систем на територіях, що вивчають. Найперспективнішими стратиграфічними комплексами для пошуку нових родовищ ВВ в межах Східного регіону України залишаються кам'яновугільні та верхньодевонські відклади.***

М е т о д и . ***Використовувались методи математичної статистики для створення модельних побудов, які дали змогу провести змістовний аналіз вихідної геологічної і геохімічної інформації. Вихідними даними були результати лабораторних досліджень методом піролізу (Rock-Eval) зразків гірських порід з пошукових і розвідувальних свердловин південного і північного бортів Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). У літологічному плані зразки керну являли собою аргіліти (переважна більшість), алевроліти, пісковики, вапняки.***

Р е з у л ь т а т и . ***Важливим результатом дослідження є те, що встановлено особливість просторового розподілу основних параметрів керогену органічної речовини залежно від глибини залягання перспективних нафтогазоматеринських порід девону, їх віку, а також – від розташування свердловин, з яких відбирався керн, – на Північному чи Південному бортах ДДЗ. Методами математичної статистики на основі кластерного аналізу виконано класифікацію зразків порід глинистого складу відносно переважального типу органічної речовини на основі даних лабораторних досліджень на апаратурі Rock-Eval.***

В и с н о в к и . ***Доволі високі концентрації органічної речовини у значній кількості досліджених зразків (переважно в аргілітах і вапняках) виявлено на різних глибинах, які передусім корегуються віковою належністю відкладів верхнього девону. Встановлено закономірності зміни T_{max} – температури максимального виходу вуглеводнів при крекінгу керогену залежно від глибини розташування гірських порід, які є відмінними на Південному і Північному бортах ДДЗ. Це свідчить про різну палеотектонічну активність вказаних структурно-тектонічних елементів у післядевонський час. На Південному борту переважно глинисті утворення з високим вмістом керогену і високими значеннями T_{max} зосереджені гіпсометрично вище, ніж на Північному борті Дніпровсько-Донецької западини.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***девон, кероген, піроліз, кластерний аналіз, вуглеводні, Дніпровсько-Донецька западина.***

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 550.382.3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04

Оксана ТОНХА[1], д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0677-5494
e-mail: oksana16095@gmail.com

Олександр МЕНЬШОВ[2], д-р геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Дмитро ЛІТВІНОВ[1], д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-6589-3805
e-mail: litvinovdv@nubip.edu.ua

Ксенія БОНДАР[2,3], д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Олена ГЛАЗУНОВА[1], д-р пед. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0136-4936
e-mail: o-glazunova@nubip.edu.ua

Олена ЛІТВІНОВА[1], канд. с.-г. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-0962-8406
e-mail: litvinova@nubip.edu.ua

Олена ПІКОВСЬКА[1], канд. с.-г. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-5052-9223
e-mail: pikovska@nubip.edu.ua

Віктор ЗАБАЛУЄВ[1], д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-9299-0651
e-mail: viaza@ukr.net

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України
[2]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[3]Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща

ОЦІНКА РІВНІВ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ПІВДНЯ УКРАЇНИ, ПОШКОДЖЕНИХ ВОЄННИМИ ДІЯМИ

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

Вступ. *Російська агресія та бойові дії в Україні спричиняють значні пошкодження та забруднення ґрунтів. Близько 139 тис. кв. км українських територій зазнали воєнного забруднення, що призводить до щорічних економічних втрат у 11,2 млрд доларів через заміновані поля. Деградаційні процеси впливають на понад 15 млн га земель, зокрема на понад 5 млн га чорноземів, які зазнали різних видів мілітарної деградації: фізичної, механічної, хімічної, фізико-хімічної та біологічної.*

Методи. *Для належного використання та дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних речовин під час аналізу та оцінки якості ґрунтів, вибору методів їх визначення й контролю, а також встановлення загальних вимог і процедур для проведення відповідних робіт використовуються нормативно-правові акти та стандарти.*

Результати. *Під час дослідження проаналізовано ґрунтові ресурси сіл Благодатне, Киселівка, Васильки та Максимівка, розташованих у Миколаївському районі на схід від Миколаєва. Оцінка коефіцієнта концентрації (Кс) виявила надзвичайно високі показники для міді (від 8,2 до 81,19) і кадмію, що вимагає запровадження комплексного моніторингу та вдосконалених технологій очищення для стабілізації екосистеми. Диференціація забруднення залежно від типу домішок показала, що зразки ґрунту, насичені нафтою, мають найвищий екологічний ризик для кадмію (Er=415) і свинцю (Er=130). У зразках без слідів вуглеводнів найбільш загрозливими є мідь (Er=220) і кадмій (Er=665). Зразки зі сріблястими металевими фрагментами демонструють критично високий ризик для кадмію (Er=1228) і міді (Er=404), а сумарний ризик (RI) досягає 1805, що свідчить про катастрофічний рівень забруднення.*

Висновки. *Рівень забруднення важкими металами високий, отже використання досліджуваних територій без технічної та біологічної рекультивації становить небезпеку. У багатьох зонах рекомендується видалення верхнього шару ґрунту через його токсичність.*

Ключові слова: *ґрунт, важкі метали, війна в Україні, забруднення.*

Вступ

Російська агресія в Україні та військові дії призводять до серйозного пошкодження й забруднення ґрунтів. За словами прем'єр-міністра Д. Шмигаля, близько 139 тис. кв. км української території зазнали воєнного забруднення, що завдає щорічних економічних втрат у розмірі 11,2 млрд доларів через заміновані поля (https://suspilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisa). Більше ніж 15 млн га земель перебувають під впливом процесів деградації ґрунтів. Особливо постраждали чорноземи – понад 5 млн га, які зазнали різних типів мілітарної деградації: фізичної, механічної, хімічної, фізико-хімічної та біологічної (Балюк, 2024).

Наукові дослідження фіксують занепокоєння щодо наслідків для ґрунтів. Збитки від екологічного забруднення, спричиненого війною, оцінюються в десятки мільярдів євро. Війна також поставила під загрозу 30 % природоохоронних територій, що загрожує біорізноманіттю, знижує здатність до поглинання парникових газів і прискорює опустелювання (Гопцій, & Анопрієнко, 2023; Кузьменко et al., 2024; Horoshkova et al., 2024).

Бойові дії спричиняють механічну руйнацію ґрунтів через бомбардування, траншеї та тунелі, що погіршує структуру ґрунтового покриву (Руденко et al., 2024). Експерти наголошують на необхідності детального обстеження пошкоджених територій із використанням

© Тонха Оксана, Меньшов Олександр, Літвінов Дмитро, Бондар Ксенія, Глазунова Олена, Літвінова Олена, Піковська Олена, Забалуєв Віктор, 2025

ISSN 1728-3817

геоінформаційних систем для оцінки та моніторингу стану земель (Pham Tung Gia et al., 2018, Tonkha et al., 2018, Ачкасов et al., 2024).

Воєнні дії значно підвищили рівні забруднення важкими металами і нафтою. У Харківській області забруднення кадмієм зросло на 200 %, а в Херсонській і Запорізькій – випадки розливу нафти збільшилися на 139 і 156 % відповідно. Як зазначено в дослідженнях Солоха та ін. (2024), уламки знищеної військової техніки, боєприпасів і залишків пального призводять до багатофакторної шкоди ґрунтовій системі, спричиняючи локальне та глобальне забруднення та втрати ґрунтових ресурсів. У всіх досліджених випадках спостерігалась механічна, хімічна та фізична деградація ґрунту. Це проявилось у змінах гранулометричних фракцій на місцях вибухів, горіннях та місцях забруднення важкими металами. Спалювання обладнання призвело до збільшення фракції піску (2,0–0,05 мм) у 1,2–1,8 раза та зменшення фракції глини (<0,002 мм) у 1,1–1,2 раза. Рівні забруднення ґрунту важкими металами значно перевищували санітарні норми, при цьому найвищі рівні забруднення спостерігаються для Pb, Zn і Cd. На всіх ділянках ураження відбулися зміни у структурі мікробіому і пригніченні активності мікробіологічних процесів (в 1,2 раза), зменшення мікробної біомаси (в 2,1 раза). Також спостерігалась висока токсичність ґрунту (99,8 %) (Solokha et al., 2024).

Аналіз забруднення ґрунту важкими металами дає змогу ухвалити науково обґрунтовані рішення щодо пріоритетності природоохоронних заходів. Використання запропонованих методичних підходів забезпечить отримання порівнянних даних про рівень забруднення та допоможе визначити ділянки, придатні для рекреаційного використання або ведення сільського господарства.

У зонах військових дій виявлено значні концентрації токсичних елементів, зокрема свинцю (Pb), ртуті (Hg), арсену (As), кадмію (Cd) та міді (Cu). Ці речовини можуть переміщуватися ґрунтом, а їхня міграція найчастіше відбувається через підземні води, які здатні адсорбувати важкі метали. Фактори, що впливають на рухливість забруднювачів, включають тип ґрунту, вологість, вміст органічних речовин і мікробіологічну активність (Harari & Annesi-Maesano, 2023).

Дослідження Дмитренко та ін., (2023) підтверджують пошкодження ґрунтів сільськогосподарського та лісового призначення внаслідок артилерійських обстрілів. Через рік після атак у верхньому шарі ґрунту (0–20 см) зафіксовано значне зростання концентрацій Cu, Zn, Ni, Cr, Cd і Pb. На відстані 2,5 м від краю вирв рівні цинку, нікелю та хрому перевищили фонові значення в 1,1–1,2 раза, свинцю – в 1,1–1,6 раза, а міді – в 1,5–1,8 раза. На відстані 30 м вміст цинку досягав 155 мг/кг, свинцю – 44 мг/кг, хрому – 41 мг/кг, а кадмію – 3 мг/кг. У кратерах вирв і до 30 м від них зафіксовано підвищення рухомих форм важких металів у 3–9 разів.

Коефіцієнт концентрації цинку становив 6–14 кларків від фону, хрому – 7–9, а свинцю – 4–8. Перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) виявлено для хрому на 7–26%, нікелю – на 15–21%, а свинцю – на 3–6%. Через рік після обстрілів перевищення ГДК для міді, цинку, кадмію і свинцю не спостерігалося (Дмитренко та ін. 2023).

Оскільки території, де знищено бронетехніку, часто розташовані на сільськогосподарських землях, вони потребують обов'язкового моніторингу та наукового контролю для подальшої рекультивації. За даними M. Solokha та співавторів, основними забруднювачами ґрунту в цих зонах є свинець (Pb), цинк (Zn) і кадмій (Cd). Вибухи та піроліз бронетехніки мають значний негативний вплив на мезобіоту ґрунту: рівень смертності дощових черв'яків становить 94,9 % протягом п'яти днів, а фітотоксичність сягає 99,8 %. Це свідчить про складну взаємодію різних факторів ґрунтового середовища після вибухів, що призводить до непередбачуваних змін у структурі та функціонуванні мікробних спільнот і мезофауни (Solokha et al., 2024).

Війна також завдала значних збитків економічній екосистемі сільського господарства України, порушивши виробничо-збутові ланцюги. Серед найнегативніших наслідків – скорочення площ оброблюваних земель через бойові дії, мінування полів, дестабілізація внутрішнього ринку та руйнування інфраструктури (Tykhenko et al., 2024; Ostapenko et al., 2022).

Родючість пошкоджених ґрунтів вимагає відновлення, що може тривати 10–20 років залежно від рівня деградації й зволоження. У Херсонській і Миколаївській областях, де функціонували зрошувальні системи, післявоєнна реабілітація потребуватиме ґрунтового очищення й меліоративних заходів для зниження вмісту солей і важких металів (Parakhnenko et al., 2023).

Воєнні дії спричиняють серйозні зміни у ґрунтовому покриві. Механічний вплив, зокрема рух важкої техніки, ущільнює та перемішує шари ґрунту, що порушує його водний режим, знижує родючість і прискорює ерозійні процеси, як водні, так і вітрові. Хімічний вплив бойових дій змінює природні властивості ґрунту через накопичення забруднювальних речовин, що утворюються внаслідок застосування зброї та військової техніки. Вибухи й обстріли призводять до забруднення важкими металами. Фізичні зміни в ґрунті відбуваються через вплив вібрацій і високих температур, що змінює його фізичні властивості. Проведення якісного комплексного моніторингу земель потребує значних ресурсів, але є нагальним завданням (Pereira et al., 2022; Petrushka et al., 2023).

Оцінка забруднення ґрунту нині більше орієнтована на сільськогосподарські потреби, ніж на екологічні наслідки. Ґрунт є "життєво важливою живою системою", яка підтримує більшість наземних форм життя, забезпечуючи їх фізичні, хімічні та біологічні потреби. Для оцінки "здоров'я" ґрунту створено індекси якості ґрунту (SQI), що дають змогу комплексно аналізувати його стан (Doran, & Zeiss, 2000).

Нещодавно опубліковані матеріали (Bonchkovskyi et al., 2025) підтвердили збагачення важкими металами забруднених воєнними діями ґрунтів, особливо кадмієм, міддю, свинцем і цинком. Проте їх концентрація переважно лише в 1,1–1,5 раза перевищує фонову та майже не перевищує гранично порогових значень в Україні. Водночас високу інформативність демонструють і магнітні методи виявлення важких металів у ґрунтах територій бойових зіткнень (Menshov et al., 2024). В основі застосування магнітних методів лежить методологія, розроблена та протестована у публікаціях (Menshov, & Sukhorada, 2012; Menhsov et al., 2021). Для вірної побудови моделі необхідно враховувати дані про геологічну будову території впливу військових дій, алгоритми застосування геофізичних методів та статистичний аналіз даних (Pigulevskiy, & Svistun, 2024; Pihulevskyi et al., 2021; Shevchuk et al., 2020; Vyzhva et al., 2010).

Воєнний стан загострив економічні, екологічні та соціальні виклики, пов'язані з продовольчою безпекою. Збройна агресія посилила проблему деградації ґрунтів, що потребує інтеграції ефективного управління земельними ресурсами в екологічну й економічну політику. Надмірна розораність, скорочення унікальних степових

екосистем і бойові дії ставлять під сумнів безпечність використання земель, що зазнали прямого впливу війни.

Методи

У ході дослідження вивчено ґрунтові ресурси сіл Благодатне, Киселівка, Васильки та Максимівка, розташованих у Миколаївському районі на схід від Миколаєва. Координати точки "Опорний пункт". https://goo.gl/maps/vzCh5x28payWcY9a6 (рис. 1).

Ґрунтовий покрив досліджуваної території представлений переважно південними малогумусними чорноземами. Вони вирізняються високою родючістю, хоча вміст гумусу в них нижчий, ніж у класичних чорноземах. Ці ґрунти мають низьку схильність до вимивання, добре утримуючи вологу та мінеральні речовини (рис. 2).

Рис. 1. Територія дослідження

Рис. 2. Ґрунти території дослідження

Для забезпечення правильного використання та дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій (ГДК) небезпечних речовин під час аналізу й оцінки якості ґрунтів, вибору методів їх визначення та контролю, а також встановлення загальних вимог і процедур для проведення відповідних робіт застосовуються нормативно-правові акти та стандарти (див. табл. 1), зокрема: ДСТУ 4770.1:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.2:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук цинку в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.3:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.5:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кобальту в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.6:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук міді в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.7:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук нікелю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.8:2007 Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук хрому в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 4770.9:2007 Якість

ISSN 1728-3817

ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук свинцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з pH 4,8 методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії; ДСТУ 7867:2015 Ґрунти та продукція рослинництва.

Ступінь забруднення ґрунту визначали згідно з ГОСТ 17.4.3.06–86 "Охорона природи. Ґрунти. Загальні вимоги та класифікація за впливом хімічних забруднювачів". Відповідно до цього стандарту ґрунти поділяються на: сильнозабруднені; середньозабруднені; слабкозабруднені. Ґрунт вважається сильнозабрудненим, якщо концентрація шкідливих речовин значно перевищує ГДК, спостерігаються низька біологічна продуктивність та суттєві зміни фізико-механічних, хімічних і біологічних характеристик, що призводить до накопичення токсинів у врожаях понад встановлені норми. Середньозабруднені ґрунти характеризуються перевищенням ГДК без суттєвого впливу на їх властивості. Якщо концентрація речовин перевищує природний фон, але не досягає ГДК, ґрунт вважається слабкозабрудненим.

Таблиця 1

ГДК та фонові значення вмісту рухомих сполук Mn, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb за визначення в буферній ацетатно-амонійній витяжці (згідно з постановою КМУ № 1325 (https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text)

Елемент	Марганець, Mn	Мідь, Cu	Цинк, Zn	Кадмій, Cd	Свинець, Pb	Нікель, Ni	Хром, Cr
	Рухомі форми (вилучення ацетатно-амонійним буферним розчином pH 4,8), мг/кг						
Гранично допустима концентрація (ГДК)							
	140	3	23	0,7	6	4	6
ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ							
За фоном України (рівень забруднення)							
Рівень забруднення	(ф) – фон	(сл) – слабкий	(пом.) – помірний	(сер.) – середній	(під.) – підвищений	(вис.) – високий	(д.в.) – дуже високий

Оцінка забруднення ґрунту базується на порівнянні з ГДК або фоновими концентраціями. Для кількісного аналізу застосовуються такі коефіцієнти:

Коефіцієнт концентрації (Кс):

$$Кс = Ci/Сф, \quad (1)$$

де Кс – коефіцієнт концентрації хімічної речовини; Ci – фактичний вміст хімічної речовини в ґрунті; Сф – середня фонова концентрація хімічної речовини у розглянутому районі.

Коефіцієнт техногенного геохімічного навантаження (Кі):

$$Кі = Ci/ГДК, \quad (2)$$

де Кі – коефіцієнт техногенного геохімічного навантаження; Ci – фактичний вміст хімічної речовини в ґрунті; ГДК – гранично допустима концентрація хімічної речовини у розглянутому районі.

Інтегральний показник поелементного забруднення (Ксі):

$$Кci = \sum_{i=1}^{n} \frac{Ci}{Сфі}, \quad (3)$$

де Ксі – інтегральний показник поелементного забруднення ґрунту; Ci – концентрації забруднювальних речовин, що контролюється; Сфі – фоновий вміст забруднювальних речовин.

Коефіцієнт реакції ґрунту на забруднення (Кр):

$$Кр = (А–Аф)/ Аф, \quad (4)$$

де А і Аф – параметри, які контролюється в забрудненій і фоновій пробах.

Щоб оцінити рівень забруднення важкими металами в ґрунтах внаслідок бойових дій і розрахувати екологічні ризики відповідно до їх токсичного впливу на навколишнє середовище, застосовано метод індексу RI, запропонований Hakanson (1980):

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \quad (5)$$

$$Er = T_r^i * P_i \ , \quad (6)$$

де Er – індивідуальний коефіцієнт потенціалу екологічного ризику, Tr – коефіцієнт токсичності металу.

Нормування значень екологічного ризику, проведені за методикою Riyad Al-Anbari et al. (2015), наведено в табл. 2 і 3.

Коефіцієнти токсичності для Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn і Ti були 30, 2, 5, 5, 5 відповідно (Hakanson, 1980).

Таблиця 2

Значення показників екологічного ризику (Riyad Al-Anbari et al., 2015)

Er	Індивідуальний коефіцієнт потенціалу екологічного ризику
Er < 40	Низький – низький коефіцієнт потенціалу і екологічний ризик
40 ≤ Er < 80	Середній – помірний коефіцієнт і потенційний екологічний ризик
80 ≤ Er < 160	Значний – значний коефіцієнт потенційний екологічний ризик
160 ≤ Er < 320	Високий – потенціал високого ризику
Er ≥ 320	Дуже високий – дуже високий екологічний ризик

Таблиця 3

Граничні значення інтегрального (RI)

RI	Комплексний потенційний екологічний ризик
RI < 90	Низький потенційний екологічний ризик
90 ≤ RI < 180	Помірний потенційний екологічний ризик
180≤ RI < 360	Високий потенційний екологічний ризик
360≤ RI < 720	Дуже високий потенційний ризик для навколишнього середовища
RI ≥ 720	Суттєво дуже високий екологічний ризик потенціал

Результати

Території, що зазнали впливу військових дій, зазнають значних змін як у структурі ландшафту, так і у хімічному складі ґрунтів. Одним з основних напрямків дослідження таких територій є типізація та моніторинг рівнів забруднення важкими металами. Це дає змогу оцінити екологічний стан земель та розробити ефективні заходи з їх рекультивації. Типізація територій передбачає

класифікацію земель за ступенем пошкодження та рівнем забруднення. Основні типи територій, які піддавалися аналізу: зони опорних пунктів: місця розташування військових баз і фортифікаційних споруд, таких як капоніри.

Результати досліджень вмісту важких металів у зразках ґрунту, взятих із різних зон капоніра, демонструють різний рівень забруднення залежно від типу домішок і хімічного складу ґрунту. Науковий аналіз отриманих даних дає змогу оцінити екологічний ризик і потенційний вплив на навколишнє середовище (табл. 4).

У групі зразків, насичених нафтою, встановлено концентрації марганцю (34,13 мг/кг) та хрому (4,00 мг/кг), які перебувають на фоновому рівні, що свідчить про їх природне походження. Мідь (24,49 мг/кг), цинк (44,16 мг/кг), кадмій (8,30 мг/кг) та свинець (155,73 мг/кг) – у межах допустимих значень, але свинець перевищує екологічні стандарти в кілька разів, що є критичним фактором забруднення. Нікель має слабкий рівень забруднення (2,40 мг/кг), що вказує на обмежений техногенний вплив.

Таблиця 4

Вміст рухомих форм важких металів у мілітарно забрудненого чорнозему південного всередині капоніру за вилучення ацетатно-амонійним буферним розчином (pH 4,8), мг/кг

Капонір	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr
Група зразків усередині капоніра, насичені нафтою	34,13 (ф)	24,49 (д.в.)	44,16 (д.в.)	8,30 (д.в.)	155,73 (д.в.)	2,40 (сл.)	4,00 (ф)
Група зразків усередині капоніра, без ознак вуглеводнів	48,05 (ф)	132,14 (д.в.)	49,98 (д.в.)	13,30 (д.в.)	177,34 (д.в.)	4,60 (пом.)	6,20 (ф)
Група зразків усередині капоніра, зі шматками сріблястого розплавленого металу	113,00 (пом)	242,54 (д.в.)	62,71 (д.в.)	24,55 (д.в.)	175,00 (д.в.)	8,80 (під.)	15,90 (сл.)
Група зразків усередині капоніра, з рудими глинистими домішками, елювіального горизонту	104,40 (пом.)	243,56 (д.в.)	50,18 (д.в.)	25,09 (д.в.)	188,70 (д.в.)	8,10 (під.)	9,40 (ф)
	14,70 (ф)	18,92 (д.в.)	41,75 (д.в.)	4,10 (д.в.)	86,09 (д.в.)	2,80 (сл.)	15,20 (сл.)
Верхній шар (гільза)	7,98(ф)	1,47(ф)	3,58(ф)	0,23(ф)	2,46(ф)	1,2(ф)	1,1(ф)
Верхній шар	12,1(ф)	1,24(ф)	5,07(ф)	0,498(ф)	2,09(ф)	1,3(ф)	4,2(ф)
Об'єм вибірки	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
Середнє	47,77 (ф)	94,91 (д.в.)	37,1 (д.в.)	10,87 (д.в.)	112,49 (д.в.)	4,17 (пом.)	8,00 (ф)
Стандартне відхилення	43,96	110,69	22,67	10,56	82,44	3,14	5,74
Помилка середнього	16,62	41,84	8,57	3,99	31,16	1,19	2,17
Коефіцієнт варіації	0,92	1,17	0,61	0,97	0,73	0,75	0,72
Мінімальне значення	7,98	1,24	5,07	0,23	2,09	1,20	1,10
Нижній квартиль	13,40	10,20	23,67	2,30	44,28	1,85	4,10
Медіана	34,13	24,49	44,16	8,30	155,73	2,80	6,20
Верхній квартиль	76,23	187,34	50,08	18,93	176,17	6,35	12,30
Максимальне значення	113,00	243,56	62,71	25,09	188,70	8,80	15,90

У ґрунтових зразках зони капоніра без ознак вуглеводнів спостерігається зростання вмісту міді (132,14 мг/кг) і свинцю (177,34 мг/кг), що вказує на накопичення металів від військових дій або промислових забруднювачів. Нікель (4,60 мг/кг) перевищує фон, демонструючи помірне забруднення. Інші елементи залишаються в межах допустимих рівнів, хоча перевищення ГДК для важких металів може спричинити токсичні ефекти для біоти.

Група зразків ґрунту із шматками розплавленого металу має значне підвищення концентрації марганцю (113,00 мг/кг) і міді (242,54 мг/кг), що свідчить про потужний техногенний вплив. Свинець (175,00 мг/кг) залишається на високому рівні, а нікель (8,80 мг/кг) та хром (15,90 мг/кг) перевищують природний фон, що створює ризик довготривалого забруднення ґрунту та вод. Аналіз зразків ґрунту з рудими глинистими домішками констатує , що марганець (104,40 мг/кг) і нікель (8,10 мг/кг) перевищують норму, що вказує на середній рівень забруднення. Свинець (188,70 мг/кг) і кадмій (25,09 мг/кг) мають високі концентрації, що підтверджує значний вплив важких металів на екосистему. Вміст хрому (9,40 мг/кг) залишається на фоновому рівні. Забруднення важкими металами у всіх досліджуваних зразках вказує на серйозний екологічний вплив військових дій. Особливо критичні концентрації свинцю, міді та кадмію, що є небезпекою зниження родючості ґрунту, токсичності для рослин і ризику забруднення ґрунтових вод.

У капонірі коефіцієнт варіації характеризувався як високий для всіх важких металів. Середній показник рухомих форм міді, цинку, свинцю і кадмію характеризувався як дуже високий.

Для повної оцінки екологічного ризику важливо визначити рівень кумулятивного забруднення ґрунту відразу кількома токсичними речовинами, базуючись на інтегральному показнику поелементного забруднення (Ксі) (табл. 5).

Сумарний коефіцієнт (Ксі=51,4–161) забруднення капонірів характеризується як небезпечний, а отже без рекультивації цю територію неможливо використовувати. Коефіцієнт концентрації забруднювальних речовин (Кс) був надзвичайно високим за вмістом міді – 8,2–81,19, інтегральний показник забруднення (Ксі) зруйнованого чорнозему південного всередині капоніру Ксі становив 51,4–161 і характеризувався як катастрофічний або сильнозабруднений. Але подальші дослідження вмісту залишків вибухових речовин можуть підвищити рівень забруднення. Верхній шар ґрунту підлягає утилізації.

Для кількісно визначення ризику для довкілля залежно від перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) хімічних елементів, пріоритизації природоохоронних заходів та забезпечення безпечного використання землі проведено нормування значень екологічного ризику території капоніру (за методикою Riyad Al-Anbari et al. (2015) і Hakanson (1980), яку наведено в табл. 6.

Результати досліджень важких металів у різних зонах капоніра, представлені у вигляді екологічного ризику (Er) для кожного елемента та сумарного ризику (RI), свідчать про значний техногенний вплив. Значення ризику дають змогу оцінити ступінь забруднення та можливі екологічні наслідки для кожного місця відбору зразків.

Таблиця 5

Коефіцієнт концентрації забруднювальних речовин (Кс) та інтегральний показник забруднення (Ксі) мілітарно забрудненого чорнозему південного всередині капоніру

Місце відбору зразка	Кс							Ксі
	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	
Насичені нафтою	0,24	8,16	1,92	13,83	25,96	0,60	0,67	51,38
Без ознак вуглеводнів	0,34	44,05	2,17	22,17	29,56	1,15	1,03	100,47
Зі шматками сріблястого розплавленого металу	0,81	80,85	2,73	40,92	29,17	2,20	2,65	159,31
Група зразків усередині капоніра, з рудими глинистими домішками, елювіального горизонту	0,75	81,19	2,18	41,82	31,45	2,03	1,57	160,97
	0,11	39,33	1,82	6,83	14,35	0,70	2,53	65,67
Верхній шар (гільза)	0,06	0,49	0,24	0,38	0,41	0,30	0,18	2,07
Верхній шар	0,09	0,41	0,22	0,83	0,35	0,33	0,70	2,92

Таблиця 6

Комплексний показник забруднення RI (Hakanson, L., 1980) мілітарно забрудненого чорнозему південного всередині капоніра, 2024 р.

Місце відбору зразка	Er							RI
	Mn	Cu	Zn	Cd	Pb	Ni	Cr	
Насичені нафтою	1,22	40,8	9,60	415	130	1,20	1,33	598
Без ознак вуглеводнів	1,72	220	10,87	665	148	2,30	2,07	1049
Зі шматками сріблястого розплавленого металу	4,04	404	13,63	1228	147	4,40	5,30	1805
Група зразків усередині капоніра, з рудими глинистими домішками, елювіального горизонту	3,73	406	10,91	1255	157	4,05	3,13	1840
	0,53	199	9,08	205	71,7	1,40	5,07	489
Верхній шар (гільза)	0,06	2,45	1,21	11,50	2,05	0,60	0,37	18,2
Верхній шар	0,09	2,07	1,10	24,90	1,74	0,65	1,40	31,9

Зразки, насичені нафтою, продемонстрували найвищий індивідуальний екологічний ризик для кадмію (Er=415), що свідчить про критичне перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) і створює значну загрозу для екосистеми. Вміст свинцю (Er=130) також становить серйозну небезпеку. Сумарний показник ризику (RI=598) вказує на високий рівень екологічної небезпеки цієї території. У зразках без ознак вуглеводнів найбільший ризик зафіксовано для міді (Er=220) і кадмію (Er=665), що зумовлює сумарний ризик (RI=1049) і потребує термінових рекультиваційних заходів для зниження рівня забруднення. Ґрунтові зразки зі шматками сріблястого розплавленого металу демонструють найвищі значення ризику: кадмій (Er=1228) і мідь (Er=404). Сумарний індекс забруднення (RI=1805) вказує на надзвичайно високий ризик для ґрунтів і прилеглих екосистем, що вимагає посилених заходів з очищення та екологічного контролю. Зразки з рудими глинистими домішками (елювіальний горизонт) також мають переважні значення ризику за кадмієм (Er=1255) і міддю (Er=406). Загальний показник (RI=1840) свідчить про катастрофічний рівень забруднення, який потребує негайного втручання.

Загальна оцінка рівня індивідуального коефіцієнта потенціалу екологічного ризику капоніру з нафтою, без нафти і зі сріблястими кульками показала дуже високий показник для Cd – 415–1255, значний Pb (Er=220–406), високий та дуже високий для міді (Er=220–406), решта металів характеризувались як низький. Комплексна оцінка рівня забруднення цього капоніра за методикою Hakanson (1980) показала суттєво дуже високий потенційний ризик для навколишнього середовища від капонірів (RI=598–1840) і потребує як технічного, так і біологічного етапу рекультивації. Забруднення важкими металами капоніру з рудими глинистими домішками призвело за класифікацією Riyad Al-Anbari et al. (2015) до дуже високого екологічного ризику.

Дискусія і висновки

Результати досліджень вказують на високий рівень техногенного впливу важких металів, що є наслідком військових дій. Особливо небезпечними є концентрації кадмію, свинцю та міді, які значно перевищують гранично допустимі концентрації, створюючи серйозні екологічні ризики для ґрунту, рослинного покриву та підземних вод.

Оцінка коефіцієнта концентрації (Кс) показала надзвичайно високі значення для міді (від 8,2 до 81,19) і кадмію, що потребує застосування комплексного моніторингу й модернізованих технологій очищення для стабілізації екосистеми.

Диференціація забруднення залежно від типу домішок показала, що зразки ґрунту, насичені нафтою, мали найвищий екологічний ризик для кадмію (Er=415) і свинцю (Er=130). У зразках без ознак вуглеводнів найбільш ризикованими є мідь (Er=220) і кадмій (Er=665). Зразки зі сріблястими металевими фрагментами демонструють критично високий ризик для кадмію (Er=1228) і міді (Er=404), а сумарний ризик (RI) сягає 1805, що свідчить про катастрофічне забруднення.

Комплексна оцінка за методикою Hakanson (1980) показала, що загальний індекс екологічного ризику для території капоніра варіюється від 598 до 1840, що класифікується як "дуже високий ризик" для довкілля. За критеріями Riyad Al-Anbari et al. (2015), це вимагає впровадження негайних рекультиваційних заходів.

Забруднення важкими металами досягло рівня, за якого використання цих територій без технічної і біологічної рекультивації є небезпечним. Верхній шар ґрунту в багатьох зонах рекомендується видалити через його токсичність.

Внесок авторів: Оксана Тонха – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Олександр Меньшов – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Дмитро Літвінов – методологія, валідація даних, вимірювання; Ксенія Бондар – ідея, аналіз та інтерпретація даних; Олена Глазунова – написання (перегляд і редагування); Олена Літвінова – валідація даних, вимірювання; Олена Піковська – формальний аналіз; Віктор Забалуєв – методологія.

Подяки, джерела фінансування. Дослідження виконувалися за проєктом PAN.BFB.S.BWZ.394.022.2023, що реалізується у рамках програми підтримки українських дослідницьких колективів Польської академії наук, що виконується у співпраці з Національною академією наук США. В рамках науково-дослідної роботи № РН/65-2024 в межах задекларованої тематики "Центр трансферу технологій штучного інтелекту для відновлення сільськогосподарських земель".

Список використаних джерел

Ачкасов, А., Попович, Н., Пересадько, В., & Гордезіані, Т. (2024). Геоінформаційне забезпечення геопорталів територіальних громад: довоєнні реалії й післявоєнні перспективи. *Серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 60, 124–136. https://periodicals.karazin.ua/geoeco/article/view/24204/21949

Балюк, С., Кучер, А., & Солода, М. (2024). Оцінка впливу війни на чорноземи як передумова відновлення їхньої родючості. *Агропортал.* https://agroportal.ua/blogs/ocinka-vplivu-viyni-na-chornozemi-yak-peredumova-vidnovlennya-jihnoji-rodyuchosti

В Україні заміновано майже 139 тисяч кв. км території – Шмигаль. *Суспільне*. 2024. https://suspilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisa

Гопцій, Д., & Анопрієнко, Т. (2023). Забруднення земель в Україні внаслідок війни: оцінка масштабів проблеми та пошук шляхів її вирішення. Екологічна і біологічна безпека в умовах війни: реалії України. Збірник матеріалів науково-практичної конференції (Україна, Київ, 19–20 липня 2023 р.). Київ. 43–49.

Дмитренко, О.В., Дем'янюк, О.С., Погоріла, Л.П., Свидинюк, Н.Л., Рожа, В.В., Кирилюк, П.М., & Романенко, В.М. (2023). Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій. *Агроекологічний журнал*, 4, 89–96. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758

Кузьменко, В.О., Третяк, Н.М., Чорнай, В.І., & Яриш, І.Ю. (2024). Воєнний екоцид в Україні як згубний наслідок застосування російських ракет та снарядів. *Scientific works of State Scientific Research Institute of AME TC*, 1(19), 62–72. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.08

Руденко, М.В., Третяк, Н.М., & Маренич, А.І. (2024). Маркетингові дослідження впливу російської агресії на стан аграрного сектора України. *Економіка. Менеджмент. Бізнес*, 2(45). https://doi.org/10.31673/2415-8089.2024.010505

Al-Anbari, Riyad, & Al Obaidy, Abdul Hameed, & Hussein Abd Ali, Fatima. (2015). Pollution Loads and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Urban Soil Affected by Various anthropogenic Activities. *International Journal of Advanced Research,* 3, 104–110. (ISSN 2320-5407). www.journalijar.com

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3–11. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 14(8), 975–1001.

Harari, S., & Annesi-Maesano, I. (2023). The war in Ukraine is an environmental catastrophe *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 27(2), 94–95(2). https://doi.org/10.5588/ijtld.22.0603

Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. https://doi.org/10.32317/ekon. apk/6.2024.10

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). *Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine*. In 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), 2024(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenigy, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7

Ostapenko, P., Bonchkovskyi, O., Shvaiko, V., & Bonchkovskyi, A. (2022). *War and soils in Ukraine: how to estimate soil losses?* Ukrainian Researchers Society. Kyiv. https://hromady.org/wp-content/uploads/2023/03/War-and-soils-in-Ukraine.pdf

Parakhnenko V.H., Zadorozhna O.M., Liakhovska N.O., & Blahopoluchna A.H. (2023). Environmental assessment of chemical pollution of soils as a result of the war. *Taurida Scientific Herald*, 131, 367–373. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/131_2023/46.pdf

Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837(2022) 155865. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865

Petrushka, K., Petrushka, I., Yukhman, Y. (2023). Assessment of the Impact of Military Actions on the Soil Cover at the Explosion Site by the Nemerov Method and the Pearson Coefficient Case Study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering,* 24(10), 77–85. https://doi.org/10.12911/22998993/170078

Pham, Tung Gia, Degener, & Jan, Kappas, Martin. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research,* 6(2), 99–110. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001

Pigulevskiy, P., & Svistun, V. (2024). Search for fresh water at the border of the Priazov megablock and the Donbas. *Geophysical Journal*, 46(3). https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306483

Pihulevskyi, P., Tiapkin, O., Anisimova, L., Kalinichenko, O., & Panteleeva, N. (2021). Geophysical and tectonic modernization of geoecological monitoring system of territories near nuclear fuel cycle objects of Ukrainian Southeast. *In 15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2021(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.

Shevchuk, V. V., Ivanik, O. M., Tustanovska, L. V., Kravchenko, D. V., Hadiatska, K. P., Tiukhtei, A., & Pikul, S. T. (2020). Geodynamics and geohazards in the Middle Dnieper Region (Ukraine). *In Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities,* 2020, 1, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055015

Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova K., & Mariychuk R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land,*13(10),., Sychevs'kyy, S., Bykova, O., Menshov, O., Kruglov, O., Kovalenko, V., Sonko, R., Hutsol, T., & Głowacki, S. (2021). *Spatial Heterogeneity of Soil Parameters in Different Forest-Steppe Landscapes of Ukraine*. Wydawnictwo SGGW.

Tykhenko, O., Martyn, A., Tykhenko, R., Openko, I., Shevchenko, O., Tsvyakh, O., Rokochynskiy, A., & Volk, P. (2024). Impact of Comparative Assessment of Soil Quality on Determining the Value of Agricultural Land (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*; 25(4), 252–261. https://doi.org/10.12912/27197050/183900

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2010). The statistical simulation of random fields on the plane in the problems of geophysics. *In Geoinformatics 2010-9th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* (pp. A055-A055). https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402814

References

Achkasov, A., Popovych, N., Peresadko, V., & Gordeziani, T. (2024). Geoinformation support of geoportals of territorial communities: pre-war realities and post-war prospects. Visnyk of V.N. Karazin Harkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", 60, 124–136. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09 [in Ukrainian].

Al-Anbari, Riyad, & Al Obaidy, Abdul Hameed, & Hussein Abd Ali, Fatima. (2015). Pollution Loads and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Urban Soil Affected by Various anthropogenic Activities. *International Journal of Advanced Research,* 3, 104–110. (ISSN 2320-5407). www.journalijar.com

Balyuk, S., Kucher, A., & Soloda, M. (2024). Assessment of the impact of the war on black soils as a prerequisite for restoring their fertility. https://agroportal.ua/blogs/ocinka-vplivu-viyni-na-chornozemi-yak-peredumova-vidnovlennya-jihnoji-rodyuchosti [in Ukrainian].

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594

Dmytrenko, O.V., Dem'anyuk, O.S., Pohorila, L.P., Svydynyuk, N.L., Rozha, V.V., Kyrylyuk, P.M., & Romanenko, V.M. (2023). Ecotoxicological assessment of sod-podzolic soil under the influence of military operations. *Agroecological Journal*, 4, 89–96. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758 [in Ukrainian].

Doran, J.W., & Zeiss, M.R. (2000). Soil Health and Sustainability: Managing the Biotic Component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3–11. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6

Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. Water Research, 14(8), 975–1001.

Harari, S., & Annesi-Maesano, I. (2023). The war in Ukraine is an environmental catastrophe *The International Journal of Tuberculosis and Lung Disease*, 27(2), 94–95(2). https://doi.org/10.5588/ijtld.22.0603

Hoptsii, D., & Anoprienko, T. (2023). Land pollution in Ukraine as a result of the war: assessment of the scale of the problem and search for ways to solve it. Ecological and biological safety in war conditions: realities of Ukraine. Collection of materials of the scientific and practical conference (Ukraine, Kyiv, July 19–20, 2023). Kyiv. 43–49 [in Ukrainian].

Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. https://doi.org/10.32317/ekon. apk/6.2024.10

Horoshkova, L., Studinska, G., Mamchur, V., Menaker, A., & Menshov, O. (2024). Assessment of the impact of the Russian-Ukrainian war on the agrarian potential in Kherson region. *Ekonomika APK*, 31(6), 10–26. https://doi.org/10.32317/ekon. apk/6.2024.10

In Ukraine, almost 139 thousand sq. km of territory is mined – Shmyhal. Public. 2024. https://suspilne.media/893279-v-ukraini-zaminovano-majze-139-tisa [in Ukrainian].

Kuzmenko, V., Tretiak, N., Chornai, V., & Yarysh, I. (2024). Military ecocide in Ukraine as a destructive consequence of the use of russian missiles and projectiles. *Scientific works
Of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification* , 19(1), 62–72. https://doi.org/10.37701/dndivsovt.19.2024.08 [in Ukrainian].

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). *Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine*. In 85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme), 2024(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenigy, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750. https://doi.org/10.1007/s41748-021-00240-7

Ostapenko, P., Bonchkovskyi, O., Shvaiko, V., Bonchkovskyi, A. (2022). *War and soils in Ukraine: how to estimate soil losses?* Ukrainian Researchers Society. Kyiv. https://hromady.org/wp-content/uploads/2023/03/War-and-soils-in-Ukraine.pdf

Parakhnenko, V.H., Zadorozhna, O.M., Liakhovska, N.O., & Blahopoluchna, A.H. (2023). Environmental assessment of chemical pollution of soils as a result of the war. *Taurida Scientific Herald*, 131, 367–373. https://www.tnv-agro.ksauniv.ks.ua/archives/131_2023/46.pdf

Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., Barcelo, D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 837(2022) 155865. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865

Petrushka, K., Petrushka, I., & Yukhman, Y. (2023). Assessment of the Impact of Military Actions on the Soil Cover at the Explosion Site by the Nemerov Method and the Pearson Coefficient Case Study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 77–85. https://doi.org/10.12911/22998993/170078

Pham, Tung Gia, Degener, Jan, & Kappas, Martin. (2018). Integrated universal soil loss equation (USLE) and Geographical Information System (GIS) for soil erosion estimation in A Sap basin: Central Vietnam. *International Soil and Water Conservation Research,* 6(2), 99–110. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.01.001

Pigulevskiy, P., & Svistun, V. (2024). Search for fresh water at the border of the Priazov megablock and the Donbas. *Geophysical Journal*, 46(3). https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.306483

Pihulevskyi, P., Tiapkin, O., Anisimova, L., Kalinichenko, O., & Panteleeva, N. (2021). Geophysical and tectonic modernization of geoecological monitoring system of territories near nuclear fuel cycle objects of Ukrainian Southeast. *In 15th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2021(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers.

Rudenko, M.V., Tretyak, N.M., & Marenich, A.I. (2024). Marketing research on the impact of Russian aggression on the state of the agricultural sector of Ukraine. *Economics. Management. Business*, 2(45). https://doi.org/10.31673/2415-8089.2024.010505 [in Ukrainian].

Shevchuk, V. V., Ivanik, O. M., Tustanovska, L. V., Kravchenko, D. V., Hadiatska, K. P., Tiukhtei, A., & Pikul, S. T. (2020). Geodynamics and geohazards in the Middle Dnieper Region (Ukraine). *In Second EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities,* 2020(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202055015

Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, & K., Mariychuk, R. (2024). Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land,* 13(10), 1614. https://doi.org/10.3390/land13101614

Tonkha, O., Nurek, T., Kravchenko, Y., Sychevs'kyy, S., Bykova, O., Menshov, O., Kruglov, O., Kovalenko, V., Sonko, R., Hutsol, T., & Głowacki, S. (2021). *Spatial Heterogeneity of Soil Parameters in Different Forest-Steppe Landscapes of Ukraine*. Wydawnictwo SGGW.

Tykhenko, O., Martyn, A., Tykhenko, R., Openko, I., Shevchenko, O., Tsvyakh, O., Rokochynskiy, & A., Volk, P. (2024). Impact of Comparative Assessment of Soil Quality on Determining the Value of Agricultural Land (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(4), 252–261. https://doi.org/10.12912/27197050/183900

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2010). The statistical simulation of random fields on the plane in the problems of geophysics. *In Geoinformatics 2010 – 9th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects* (pp. A055–A055). https://doi.org/10.3997/2214-4609.201402814

Отримано редакцією журналу / Received: 23.12.24
Прорецензовано / Revised: 08.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Oksana TONKHA[1], DSc (Agricult. Sci.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0677-5494
e-mail: oksana16095@gmail.com

Oleksandr MENSHOV[2], DSc (Geol.), Senior Researcher,
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Dmytro LITVINOV[1], DSc (Agricult. Sci.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-6589-3805
e-mail: litvinovdv@nubip.edu.ua

Kseniia BONDAR[2,3], DSc (Geol.)
ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Olena GLAZUNOVA[1], DSc (Ped. Sci.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0136-4936
e-mail: o-glazunova@nubip.edu.ua

Olena LITVINOVA[1], PhD (Agricult. Sci.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0962-8406
e-mail: litvinova@nubip.edu.ua

Olena PIKOVSKA[1], PhD (Agricult. Sci.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5052-9223
e-mail: pikovska@nubip.edu.ua

Viktor ZABALUEV[1], DSc (Agricult. Sci.), Prof.
ORCID ID: 0000-0001-9299-0651
e-mail: viaza@ukr.net

[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
[2]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[3]Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

ASSESSMENT OF SOIL POLLUTION LEVELS IN SOUTHERN UKRAINE DAMAGED BY MILITARY ACTIONS

Background. ***Russian aggression and military actions in Ukraine have caused significant soil damage and contamination. Approximately 139,000 square kilometers of Ukrainian territory have been affected by war-related pollution, leading to annual economic losses of $11.2 billion due to mined fields. Degradation processes impact over 15 million hectares of land, including more than 5 million hectares of chernozems, which have undergone various types of military degradation: physical, mechanical, chemical, physico-chemical, and biological.***

Methods. ***To ensure proper use and compliance with maximum allowable concentrations (MAC) of hazardous substances during soil analysis and quality assessment, the selection of detection and control methods, as well as the establishment of general requirements and procedures for related activities, regulatory legal acts and standards are applied.***

Results. ***During the study, soil resources in the villages of Blahodatne, Kyselivka, Vasylky, and Maksymivka, located in the Mykolaiv district east of Mykolaiv, were analyzed. The concentration coefficient (Ks) assessment revealed extremely high values for copper (ranging from 8.2 to 81.19) and cadmium, necessitating the implementation of comprehensive monitoring and advanced purification technologies to stabilize the ecosystem. The differentiation of pollution based on the type of impurities showed that soil samples saturated with oil had the highest ecological risk for cadmium (Er=415) and lead (Er=130). In samples without hydrocarbon traces, the most hazardous elements were copper (Er=220) and cadmium (Er=665).***

Samples containing silvery metallic fragments exhibited a critically high risk for cadmium (Er=1228) and copper (Er=404), while the total risk index (RI) reached 1805, indicating a catastrophic level of contamination.

C o n c l u s i o n s . ***The level of heavy metal pollution is high, making the use of the studied areas unsafe without technical and biological reclamation. In many zones, removing the topsoil layer is recommended due to its toxicity.***

K e y w o r d s : ***soil, heavy metals, war in Ukraine, pollution.***

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.

UDC 550.8.05+624.235+504.056:355.4
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.05

Taras BILYI[1], DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9901-6621
e-mail: belyit@gmail.com

Dmytro HLAVATSKYI[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Ievhen POLIACHENKO[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

Galyna MELNYK[1], PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-3609-1181
e-mail: melnykgv@gmail.com

Semen CHERKES[1], PhD Student, Engineer
ORCID ID: 0000-0002-8304-7159
e-mail: semyoncherkes@gmail.com

Dmytro LITVINOV[1], PhD (Phys. & Math.), Researcher
ORCID ID: 0009-0003-0722-8171
e-mail: litvinovda.job@gmail.com

[1]Institute of Geophysics by S.I. Subbotin, Kyiv, Ukraine

THE DEGREE OF SOIL DEGRADATION AND AEROSOL FORMATION FROM EXPLOSION PRODUCTS RESULTING FROM HOSTILITIES IN UKRAINE

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Background. *On the territory of Ukraine, where large-scale hostilities are taking place, industrial production and developed transport infrastructure are concentrated, in particular, every tenth enterprise has an increased (1st or 2nd) hazard class. Arable fields suffered no less damage from shelling and mining, which negatively affects food security in the world. The degree of ecological hazard of the territory where hostilities took place is determined primarily by the level of surface concentrations of pollutants entering the natural environment. Concentrations, as well as the range and area of dispersion of pollutants depend on the parameters of the explosion, the height of the explosion product clouds, and meteorological conditions.*

Methods. *For war-affected areas, mechanisms for assessing the degree of mechanical damage to soils and dust from a gas-dust cloud into the environment were proposed based on methods used at mining enterprises to analyze environmental hazards.*

Results. *The studies were carried out in the field, where ca.1000 craters of various diameters were identified. The main parameters of the explosion were estimated based on the morphological shapes of the craters: the volume of displaced (or destroyed) soil, the mass of aerosol and dust that entered the atmosphere, the width and height of the pile - the scattering of soil from the centre of the explosion. The height of the gas-dust cloud from large explosions was calculated, which is extremely important for modelling the dynamics of solid particles in the cloud and solving problems of regional pollution transportation.*

A sequential algorithm was developed for assessing the destruction and damage to soils and the release of aerosol and dust into the atmosphere, which is formed during ground explosions.

Conclusions. *An algorithm for calculating the degree of soil damage and dust ingress into the atmosphere from artillery weapons of various calibers has been proposed. Calculations of the height of the gas-dust cloud from large explosions and the scattering of earth from the crater have been obtained. The cumulative effect of soil damage and atmospheric pollution by substances from explosion products per day, month and year has been estimated. The results of comparing the damage caused to soils and emissions of harmful substances into the atmosphere as a result of the war are comparable in scale to the operation of an average quarry in Ukraine for a year. Given the scale of the battle lines environmental pollution would have catastrophic consequences.*

Keywords: *Russian-Ukrainian war, aerosol, dust, soil degradation.*

Background

As a result of the war, large areas in Ukraine were subjected to massive bombardment with various types of weapons, and more than 30 % of its territory has been contaminated with mines and unexploded ammunition (Fig. 1). The ecological consequences of military actions in Ukraine are primarily related to soil damage, emissions of aerosols and dust during explosions, urban and forest fires, and burning of oil storage facilities. Under constant fire and without proper maintenance, there are enterprises and areas of storage of dangerous substances, which are a potential source of ecological disaster both on a local and regional scale (Savosko, 2016; Dytłow, & Górka-Kostrubiec, 2021; Splodytel et al., 2023).

The soils are the most impacted by a warfare (Hupy, & Schaetzl, 2006; Hupy, & Koehler, 2012; Broomandi et al., 2020; Williams, & Rintoul-Hynes, 2022; Menshov et. al, 2024 a,b; Bonchkovskyi et al., 2025). Shell bursts contaminate the ground cover with numerous chemicals and metal fragments. At the place of projectile ruptures in the soil craters or recesses are formed. In some places, the density of sinkholes is so condensed that they can be easily detected in space images. According to their morphometric forms, the caliber of ammunition is determined, which provides the information about its basic chemical composition and other characteristics. In places where the density of sinkholes is significant, soil destruction and contamination occur (Splodytel et al., 2023, Bonchkovskyi et al, 2023; Bilyi et al., 2024). A very low detoxification capacity for heavy metals is characteristic of soils. Chemical substances that have entered the soil are dispersed, which contributes to their rapid entry into the soil, and from there into surface water. The study of soil pollution in the developed areas of the metallurgical industry of Ukraine is given in (Savosko, 2016) and (Bondar et al., 2023). The authors (Bondar et al., 2024; Datsko et al., 2024; Hlavatskyi et al., 2024; Menshov et al., 2024, b; Solokha et al., 2024; Bonchkovskyi et al., 2025) published the results of pollution

© Bilyi Taras, Hlavatskyi Dmytro, Poliachenko Ievhen, Melnyk Galyna, Cherkes Semen, Litvinov Dmytro , 2025

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

studies of soils with heavy metals as a result of the acute phase of the Russian-Ukrainian war. In addition, active hostilities almost triple the aerosol load on the atmosphere, which is confirmed by satellite data of the absorption index (ABI) (Boychenko, 2024). Clouds of explosion products, rising into the atmosphere, drift with the wind, leaving traces of dust on the ground, which leads to the spread of pollution, including heavy metals, at a considerable distance from the places of explosions (Hurin et al., 2007; Kolesnik et al., 2014). Aerosols and dust cause anthropogenic stress on land cover (Turner et al., 1980; Yang et al., 2021; Gao et al., 2023), scatter and absorb solar radiation (Pittock et al., 1990); as a result, the understory surface does not receive solar energy, which can lead to local changes in the growing season. In addition, surveillance and environmental monitoring in connection with potential danger are not carried out in combat zones and adjacent territories. In such territories, the analysis of the damage caused by the Russian invasion is possible with the help of space images with a high spatial resolution, which, thanks to various techniques, calculate the number of sinkholes, destroyed buildings, damage to the soil cover, etc. (Splodytel et al., 2023; Bonchkovskyi et al., 2023; Kozlova, & Velikodsky, 2024; Kravchenia et al., 2024). Thus, morphometric parameters of the craters are obtained, the volume of displaced soil is calculated, and the caliber of the ammunition is tentatively identified.

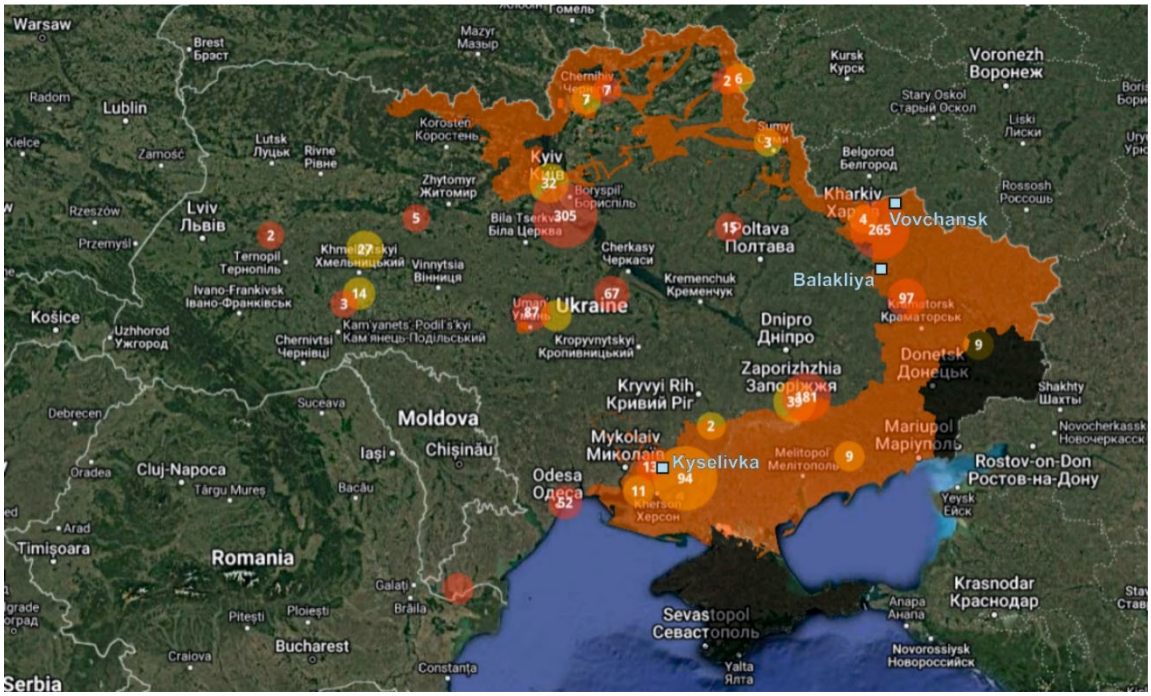


Fig. 1. Map of dangerous zones and territories affected by the war (as of November 2024, State Emergency Service of Ukraine, https://mine.dsns.gov.ua/, date of access 12.12.2024)

The soils are the most impacted by a warfare (Hupy, & Schaetzl, 2006; Hupy, & Koehler, 2012; Broomandi et al., 2020; Williams, & Rintoul-Hynes, 2022; Menshov et. al, 2024 a, b). Shell bursts contaminate the ground cover with numerous chemicals and metal fragments. At the place of projectile ruptures in the soil craters or recesses are formed. In some places, the density of sinkholes is so condensed that they can be easily detected in space images. According to their morphometric forms, the caliber of ammunition is determined, which provides the information about its basic chemical composition and other characteristics. In places where the density of sinkholes is significant, soil destruction and contamination occur (Splodytel et al., 2023, Bonchkovskyi et al., 2023; Bilyi et al., 2024). A very low detoxification capacity for heavy metals is characteristic of soils. Chemical substances that have entered the soil are dispersed, which contributes to their rapid entry into the soil, and from there into surface water. The study of soil pollution in the developed areas of the metallurgical industry of Ukraine is given in (Savosko, 2016) and (Bondar et al., 2023). The authors (Bondar et al., 2024; Datsko et al., 2024; Hlavatskyi et al., 2024; Menshov et al., 2024, b; Solokha et al., 2024) published the results of pollution studies soils with heavy metals as a result of the acute phase of the Russian-Ukrainian war. In addition, active hostilities almost triple the aerosol load on the atmosphere, which is confirmed by satellite data of the absorption index (ABI) (Boychenko, 2024). Clouds of explosion products, rising into the atmosphere, drift with the wind, leaving traces of dust on the ground, which leads to the spread of pollution, including heavy metals, at a considerable distance from the places of explosions (Hurin et al., 2007; Kolesnik et al., 2014). Aerosols and dust cause anthropogenic stress on land cover (Turner et al., 1980; Yang et al., 2021; Gao et al., 2023), scatter and absorb solar radiation (Pittock et al., 1990); as a result, the understory surface does not receive solar energy, which can lead to local changes in the growing season. In addition, surveillance and environmental monitoring in connection with potential danger are not carried out in combat zones and adjacent territories. In such territories, the analysis of the damage caused by the Russian invasion is possible with the help of space images with a high spatial resolution, which, thanks to various techniques, calculate the number of sinkholes, destroyed buildings, damage to the soil cover, etc. (Splodytel et al., 2023; Bonchkovskyi et al., 2023; Kozlova, & Velikodsky, 2024; Kravchenia et al., 2024). Thus, morphometric parameters of the craters are obtained, the volume of displaced soil is calculated, and the caliber of the ammunition is tentatively identified.

The aim of this study is the development of a consistent algorithm for assessing the degree of soil damage and atmospheric air pollution with dust from explosions as a result of military operations in Ukraine.

The research methodology is based on the common methods of assessing the ecological danger of atmospheric and soil pollution that are used at mining enterprises.

The scientific novelty involves the integration of methods for assessing the mechanical destruction of the upper layers of the soil, formation of craters and accumulation of soil, as well as the parameters of the gas and dust cloud, which are used for the first time to assess the man-made consequences of Russian aggression.

Firstly, the proposed algorithm will allow assessing the degree of soil damage in the territories, where hostilities took place. Secondly, it helps to evaluate the quantitative indicators of man-made load on the ground cover due to dust entering the atmosphere during explosions, which then settles on the surface of the soil. The obtained data will be useful in the assessment of environmental hazards and in the development of effective solutions for the purpose of localization of contaminated areas and their restoration.

Explosion in the soil. Soil explosions can be of two types: a crater explosion (sometimes called the soil ejection explosion), and a relatively deep explosion, where no visible changes to the soil surface are observed, i.e., the camouflage explosion. There are three types of disturbances in the soil: explosion due to soil release, explosion destruction of underground structures, and seismic action of the explosion.

Let's focus on the main parameters of the destructive effect of the explosion on the allocation of soil. This type of explosion is used both for civilian and military purposes, to damage ground and underground objects. One should expect the formation of craters of increased emission of a larger volume, which is observed on the battlefields. The shape and dimensions of the crater depend on a large number of factors, the main of which are the power of the explosion and the composition of the soil (Bull, 1983; Persson et al.,1994). The ejection charge must have sufficient energy not only to crush the rock, but also to eject it from the resulting craters. Depending on the magnitude of the explosion action index $n=r/W$, the discharge charge is divided into three types: reduced when n<1, normal when n=1, enhanced when n>1 (see Fig. 2), where r is the radius of the craters, W is the depth of the crater.

The ejection crater is a cone-shaped recess in the rock, formed by the explosion of an explosive charge (Fig. 3). There are three stages of the allocation crater: theoretical – used to calculate the explosive charge; real – craters formed at the moment of soil ejection (the soil is in the air); visible – craters formed in the Earth's crust after the fall of the soil, i.e. after the explosion ends.

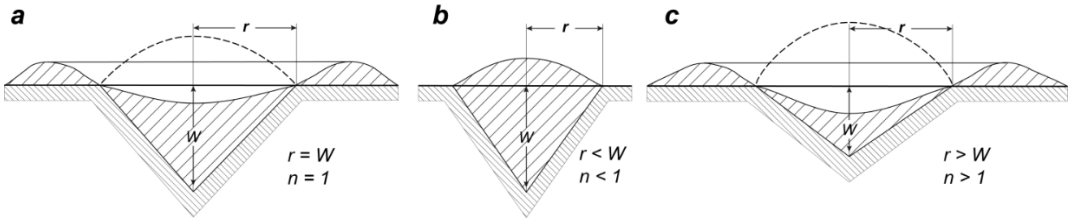


Fig. 2. Scheme of soil emission charges from the explosion action index. *r* is the radius of the craters, W is the depth of the crater, n=r/W is the explosion action index (adapted from (Technical …, 1972))

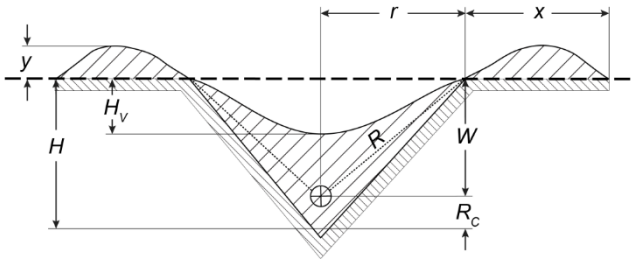


Fig. 3. Definitions of the crater dimensions (designation in the text: adapted from (Technical …, 1972)

The following elements are distinguished in the ejection crater (Glasstone, & Dolan, 1977): r – the upper radius, which is equal to the radius of the circle that forms the upper base of the crater; R is the radius of the explosion degree which is the distance from the center of the charge to any point on the edge of the crater; W is the shortest distance from the charge center to the original ground surface; H_v is the apparent depth of the crater; H is the depth of the actual crater; x is ejecta portion of lip, y – height of the lip crest; R_c is the compression radius, the distance from the center of the charge to the bottom of the crater.

The dimensions of the crater vary tens of times when moving from one type of soil to another, or with variations in the depth and/or height of undermining (Ambrosini et al., 2004; Bjelovuk et al., 2015). Therefore, the identification of an exploded projectile based on the morphological features of the crater is approximate, but the volume of the ejected soil will correspond to the volume of the formed crater. For example, the notch from an 82-mm mine explosion, even if the mine sinks into the soil to the optimal depth, is small: with a diameter of 1 meter and a depth of about 50-60 centimeters. However, usually the crater is smaller in size since the 82-mm mine is not intended for firing at the destruction of objects but is designed only for fragmentation and bursts before it penetrates the soil.

Methods

The explosive substance is a highly concentrated chemical energy source. One kilogram of explosive substance of medium power releases during the explosion in t~10^{-5} s of the order of $4 \cdot 10^3$ kJ of heat energy and destroys about 1 m^3 of the substance. The products of the explosion have significant pressure (~$4 \cdot 10^{10}$ N/m^2) and high temperature (~ 4000 K). This leads to the crushing and scattering of the substance, which consumes about

90% of the energy of the explosion. The size of the formed crater mainly depends on the power of the explosion and the properties of the soil. The empirical equation for calculating the volume of the crater has the following formula (Orlenko, 2002):

$$V=1.4r^2H_v, \qquad H_v=0.35W(2n-1),$$

where V is the volume of the crater m^3, r is the radius of the crater, m, H_v is the apparent depth of the crater, m. The radius of the explosion can be calculated as follows:

$$R^2= W(1+n^2)=r^2+W^2$$

After the explosion, a small part of the ejected material falls back into the crater, the latter is concentrated at a distance of about 3÷5 radii from the center of the explosion. In conditions of horizontal relief, the ejecta portion of lip and height of the lip crest (see Fig. 3) during the explosion on the allocation are approximately determined by the formulas (Technical…, 1972):

$$x=5nH_v, \text{ m},$$
$$y=0.7H_v/n, \text{ m}.$$

The height of the lip crest above the crater increases the size of the crater by increasing the land on the surface. If the volume of the crater is known we can find the mass of the thrown soil:

$$M=V\cdot\rho,$$

where M is the total mass of allocated soil, kg; V – soil volume, m^3; ρ is soil density, kg/m^3. When the explosion is powerful enough, it is necessary to take into account the volume and mass of the annular crest where the soil is compacted. The equations for crest volume and soil compaction mass are as follows:

$$V_c=\pi r^2 h, \; M_c=V_v\rho \text{ where } h=0.25W.$$

Then the mass of the allocated soil will be $M_{es}=M-M_c$, where M_c is the mass of the soil of the ring shaft. Taking into account the mass of the detonating substance, the energy of the explosion is calculated as $E_d=\varepsilon_d\cdot m_d$, where m_d is the mass of the explosive substance, ε_d is the specific energy release of $4.18\cdot10^6$ J/kg. We estimate the mass of the destroyed substance using an expression borrowed from the study (Chernogor, 2003):

$$M_r= E_d/\varepsilon,$$

where $\varepsilon=5\cdot10^3\div10^5$ J/kg is the specific crushing energy, which depends on the rock class.

Dust emissions are significant only in the case of a near-surface or shallow explosion. Dispersed composition of clouds formed from explosions are very diverse and large particles settle immediately after the explosion, and small particles and dust are captured by the rising flow to significant heights due to convection and atmospheric turbulence. From the point of view of social and ecological danger caused by atmospheric pollution, the greatest threat is the total mass of aerosols – particles with characteristic sizes of r~20÷200 μm. For this range, the particle mass distribution is close to lognormal (Kolesnik et al. 2014; Yang et al., 2021; Gao et al., 2023), and their mass M_a is 10–15% of the mass of the destroyed substance M_r. It is believed that the mass of dust that "hangs" in the atmosphere for a long time is $M_{dust}=M_a/4$ (Chernogor, 2003). Particles, smaller than 20 μm, can travel tens and hundreds of kilometers.

The thermal energy released during the explosion leads to the release into the atmosphere of the hot products of the explosion together with the destroyed substance. For a standard atmosphere, the height of the cloud lift is related to the energy of the explosion, which is described by the relation:

$$H=1.87E_d^{\,1/4},$$

where H is the height of the cloud, m; E_d – explosion energy, J. According to Gould & Tempo (1983), 120 s after the explosion the diameter of the cloud and its volume will be $D_x=335\ E_d^{0.25}$ m, $V_x=3\cdot10^{-2}E_d^{0.75}$ km^3. When the density of the rising air equals the density of the environment, the further evolution of the cloud will be determined mainly by diffusion. At this stage, the wind and its distribution over height play the biggest role.

Results

Field observations of the consequences of intensive warfare were conducted in the Mykolayiv Oblast – near the village of Kyselivka in the Pervomayska Hromada of the Mykolaiv Rayon, and in the Kharkiv Oblast – around the city of Balakliya of the Izyum Rayon. In Fig. 4, typical craters, left on the battlefield by artillery, bomb and missile strikes, are shown.

The main parameters of the explosion depending on the mass of the explosive substance in the soil of medium hardness are calculated on the basis that the projectiles have a high-explosive fragmentation effect (Tab. 1). The radii and depths of the craters are represented by the average value for each type of ammunition. The mass of the explosive substance was taken from open sources.

Fig. 4. Craters near the village of Kyselivka in the Pervomayska Hromada of the Mykolaiv region:
a) crater from a shell approximately 200–230 mm, b) crater from a cannon shell approximately 122 mm, c) crater from the explosion of a saltpeter compound after a shell hit it. Pictures made in March, 2024

Table 1

Dependencies of the main parameters of the explosion on the mass of the explosive substance

Caliber, mm	m_d, kg	E_d, J	r, m	W, m	V, m^3	M	M_r	M_a	M_{dust}
M-82	0.465	$1.94\cdot10^6$	0.4÷0.6	0.1÷0.2	0.11	0.132	0.39	0.039	0.001
G-76-107	0.74	$3.09\cdot10^6$	0.75÷1	0.4÷0.5	0.30	0.363	0.68	0.068	0.002
G-122	4,54	$1.89\cdot10^7$	2.5÷4	0.4÷0.7	6.7	7.9	3.8	0.379	0.095
G-152	8,78	$3.67\cdot10^7$	3÷5	1.5÷1.8	10.7	12.8	7.3	0.734	0.183
G-203	16,73	$6.99\cdot10^7$	3	2,2	16.7	20.1	13.9	1.4	0.349

Note: In the left column, the letter *M* indicates a mortar mine, the letter G a gun shell. To the right, M is total mass of displaced soil, tons, M_r is mass of the destroyed substance, tons, M_a is mass of the aerosols, tons, M_{dust} is mass of the dust, tons.

As can be seen from Tab. 1, the greater the mass of the explosive substance (caliber of the projectile) is, the more damage was done to the soil and more products of the explosion enter the atmosphere. Our calculations are in good agreement with the results obtained in previous studies (Sploditel, 2022; Bonchkovskyi et al., 2023, p. 481; Kravchenia et al., 2024). However, if the mass of the explosive substance is known, it is possible to calculate the mass of the destroyed substance without involving the parameters of the craters. These calculations could be helpful in comparing with those obtained from satellite images, as well as in estimation of the amount of aerosol that enters the atmosphere. It is significant that the mass of destroyed substance M_r has an underestimated value compared to the total mass of displaced soil M, calculated according to the volume of the crater (Tab. 1). This is due to the fact that when calculating the energy of the explosion, we use energy that is a multiple of the TNT equivalent. But nowadays, shells use an explosive substance more powerful than TNT – phlegmatized hexane A-IX-1-2 (1.22–1.55 in TNT equivalent). Thus, if the coefficient of the TNT equivalent of hexane is taken into account in the calculations, the difference between the masses is equalized.

Considering how powerful explosions affect the soil and atmosphere, we will perform two calculations (Tab. 2). In the first case, the explosion of a FAB-500 aerial bomb, in the second, the explosion of saltpeter storage (Fig. 4, c) are listed. Fig. 5 illustrates a typical extent of the rise of a dust and gas cloud from the explosion of an FAB-1500 aerial bomb.

Table 2

Dependence of the main parameters of the explosion on the mass of the explosive substance

Value, units	FAB500 aerial bomb	The explosion of the saltpetre composition
m_d, kg	500	12873
r, m	11,5	25
W, m	4.3	11
V m^3	796	9625
V_c ,	446	5396
M , tons	955	11550
M_c , tons	535	6476
M_{es} , tons	420	5079
x, m	57.5	125
y, m	1.12	3.39
E_d , J	$2.09\cdot10^9$	$5.38\cdot10^{10}$
M_r, tons	418	10762
M_a , tons	41.8	1076
M_{dust} , tons	10.5	269
H_c	400	900
$^*E_d$, J	$2.55\cdot10^9$	$9.14\cdot10^{10}$
$^*M_r$, tons	409	18295
$^*H_c$	420	1028

Note: m_d – mass explosive substance, r, W – radius and depth of the crater, V – crater volume, V_c – volume of the ring shaft of rock, M – total mass of displaced rock, M_c – mass of the ring shaft of rock, M_{es} – mass of ejected rock, x, y – ejecta portion of lip and height of the lip crest, H_c – height of the cloud, M_r, M_a, M_{dust} is mass of the destroyed substance, aerosols and dust, tons. * – calculations were made for phlegmatized hexogen A-IX-1-2 and saltpeter.

Fig. 5. Explosion of FAB-1500 guided aerial bomb, Vovchansk, Kharkiv region.
(Source: https://ua.korrespondent.net/ukraine/4720531-rosiiany-skynuly-nadpotuzhnu-bombu-na-vovchansk, date of access 12.12.2024)

The morphometric dimensions of the crater, which are formed during bombing from heights of 1200–3500 m by aerial bombs at a set deceleration of the detonator of 0.2 s, follow (Balaganskyi, & Merzhnevskyi, 2004). The mass of nitrate that exploded was calculated according to (Technical …, 1972): $Q=K_V W^3(0.4+0.6n^3)$, kg, where K_B is the estimated specific consumption of the explosive substance, kg/m^3; W – crater depth, m; n is the index of the explosion. For the discharge charge, K_V has average values from 1 to 1.5 according to the discharge charge, the K_V has average values from 1 to 1.5 according to the classification of building standards and regulations (dense sand, loam, loam clay, loess).

According to Tab. 2, high-power explosions are tens to hundreds of times greater than mortar and barrel artillery explosions. Consequently, the explosion of several FAB-500, FAB-1500 aerial bombs causes more damage than hundreds of shells in a certain period of time. Nowadays, Russia drops more than 30 guided aerial bombs per day which causes irreparable damage to the environment. The accumulative effect of soil damage and

atmospheric pollution with substances from explosion products as a result of hostilities is presented in Fig. 6.

Fig. 6 is given according to the following calculations:

1. The average amount of artillery ammunition that Russia spends per day is 30000 units (see https://suspilne.media/818001-rosia-vitracae-za-dobu-vtrici-bilse-boepripasiv-niz-ukraina-sirskij/, date of access 12.12.2024). The average explosive substance of one artillery projectile is 6.25 kg (calculated as the average of the sum of the masses of the explosive substance given in Tab. 1). Cumulative values for the month and for the year are calculated similarly.

2. The average number of FAB-500 and FAB-1500 aerial bombs that Russia uses per day is 30. The average explosive substance of one aviation bomb is 2000 kg (based on 15 FAB-500 bombs and 15 FAB-1500 bombs) (https://tsn.ua/ato/skilki-rosiya-maye-kerovanih-aviabomb-ekspert-prigolomshiv-zayavoyu-2516278.html, date of access 12.12.2024).

The results shown in Fig. 6 can be compared with emissions of harmful substances into the atmosphere, obtained at the quarries of Ukraine. For example, on average, about 6000 tons of explosives are used and about 7500 m^3 of rock is destroyed per quarry in Kryvbas region (Kolesnik et al. 2014). In our case, only due to the FAB-500 and FAB-1500 aviation bombs, the total mass of explosives for a year will be about 7500 tons. Therefore, with an explosive consumption of 09–1.0 kg/m^3, we have about 7500 m^3 of destroyed soil, and the volume of dust will be about 2500 tons. The total mass of explosives of rocket, mortar and barrel artillery, fires of oil storage facilities and forests must be added as well. Thus, we will have along the entire line of combat clashes in addition to background pollution, soil damage and atmospheric pollution as a result of military actions equivalent to the consequences of the operation of hundreds of average statistical quarries in Ukraine for a year.

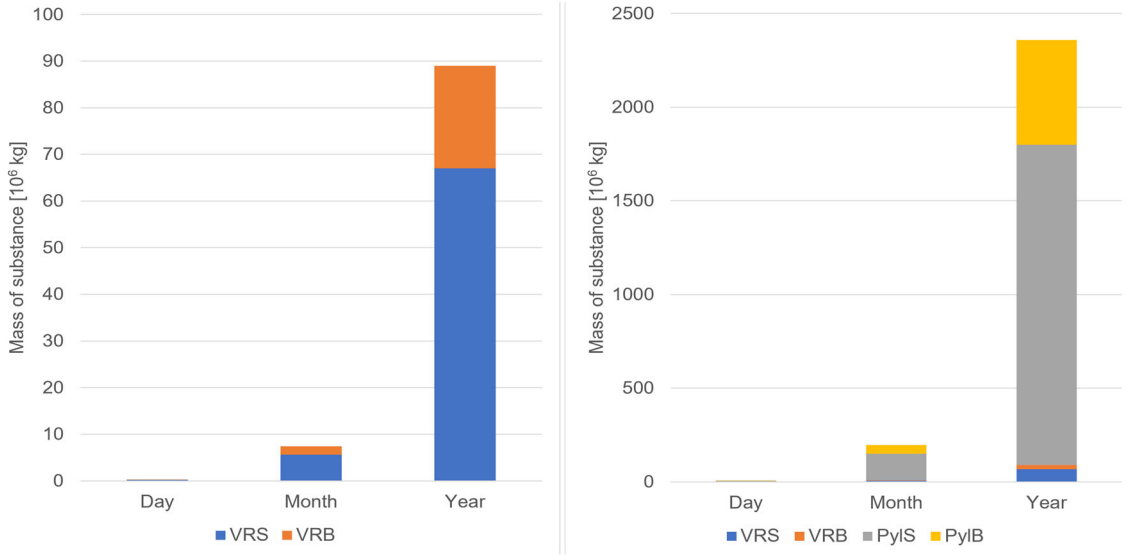


Fig. 6. Accumulative effect of soil damage and dust pollution of the atmosphere
VRS –mass of the explosive substance of artillery ammunition; VRB –mass of the explosive substance of aviation bombs; PylS – mass of dust from artillery ammunition; PylB – mass of dust from aviation bombs

Discussion and conclusions

The affected area is mainly a loess-soil cover, which occupies 74.8 % of the territory of Ukraine (Khotynenko, 2014). Loess contains more than 50% dust particles. Since there is a high density of industrial enterprises and hazardous substance storage areas (dumps and sludge storages) in the research region, soil disturbance as a result of military operations is a source of dangerous effects for humans and the environment due to high rates of dust and gas emission, and transfer of dangerous compounds from explosions and from the surfaces of man-made landscapes.

The results of field research in the Kyselivka village in the Pervomayska Hromada of the Mykolaiv region, and in the Kharkiv region around the city of Balakliya, indicate that calculations of the degree of soil damage and the ingress of dust into the atmosphere depends on types of aerial bombs and artillery weapons of various calibers. For instance, for the FAB-500 aerial bomb, the height of the gas-dust cloud of explosion products is about 400 m. Soil scattering and height of the crest are 57 m and 1.2 m respectively. This gives an understanding of what area of soil cannot be restored without special reclamation.

Estimates of the accumulative effect of soil damage and atmospheric pollution by substances from explosion products per day, month, and year were obtained. Analysis of the results for the year showed that approximately 3 Mt of substance was destroyed during the explosions of all munitions. The mass of aerosols was about 0.3 Mt. Aerosol particles of the fine-dispersed fraction ~ 20 μm are carried by explosions and convective processes to rather high altitudes (1÷2 km), where the aerosol existence time is 1÷10 days.

Harmful substances that enter the natural environment create tangible negative effects in a radius of tens of kilometers from the places of explosions, which negatively affects agricultural lands and adjacent territories. Therefore, the assessment of man-made load on the atmosphere and soil as a result of bombing is extremely important in the comprehensive study of the "ecological genocide" of Ukrainian territories as a result of Russia's military aggression.

Authors' contribution: Taras Bilyi – writing, investigation, methodology, formal analysis, conceptualization, data curation, supervision; Dmytro Hlavatskyi – investigation, field work, conceptualization, visualization, data curation; Ievgen Poliachenko – field work, validation, writing; Galyna Melnyk – formal analysis, data curation; Semen Cherkes – field work, methodology, visualization; Dmytro Litvinov – investigation, data curation.

Acknowledgements, sources of funding. The study was partly supported by the budget allocation from the National Academy of Sciences of Ukraine for research work 0124U000085 and 0123U100303.

References

Ambrosini, R.D., & Luccioni, B.M. (2006). Craters Produced by Explosions on the Soil Surface. *Journal of Applied Mechanics*, 73(6), 890. https://doi.org/10.1115/1.2173283

Balaganskyi, I.A., & Merzhnevskyi, L.A. (2004). *Action of means of destruction and ammunition*. Izd-vo NGTU [in Russian]. [Балаганский, И., & Мержиевский, Л. (2004). *Действие средств поражения и боеприпасов*. НГТУ].

Bilyi, T., Melnyk, G., Poliachenko, Ie., Hlavatskyi, D., & Cherkes, S. (2024). Bombturbation as a consequence of man-made load on the natural environment. International Conference of Young Professionals *"GeoTerrace-2024"*, Oct 2024, Vol. 2024, (pp.1–5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510026

Bjelovuk, I., Jaramaz, S., Elek, P., Micković, D., & Kričak, L. (2015). Modelling of characteristics of a crater emerged from a surface explosion on the soil. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 51(3), 395–400. https://doi.org/10.1134/s001050821503017x

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Bonchkovskyi, A., & Shvaiko, V. (2025). War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): Physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of The Total Environment*, 964, 178594. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178594

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Shvaiko, V., & Bonchkovskyi, A. (2023). Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine (the case study of Kyinska territorial hromada). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(3), 474–487. https://doi.org/10.15421/112342

Bondar, K., Bakhmutov, V., Menshov, O., Poliachenko, I., & Hlavatskyi, D. (2023). Detecting war-related pollution of soils using magnetic and geochemical methods. First results from recaptured outskirts of Kyiv. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Nov 2023, Vol. 2023, (pp. 1–5). http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.2023520209

Bondar, K.M., Tsiupa, I.V., Sachko, A.V., & Nasiedkin, I.I. (2024). Pre-war situation with soil pollution in the city of Zaporizhzhia: metallurgical industry center in Ukraine-characterized by magnetic, geochemical and microscopy methods. *Acta Geophysica*, 72(2), 1355–1375. https://doi.org/10.1007/s11600-024-01297-4

Boychenko, S.G. (2024). Meteorological and climatic consequences of military actions in Ukraine: According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, November 29, 2023. *Visny Nacionalnoi Academii Nauk Ukrainy*, 1, 83–93 [in Ukrainian]. [Бойченко, С.Г. (2024). Метеорологічні та кліматичні наслідки воєнних дій в Україні: За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 29 листопада 2023 року. *Вісник Національної академії наук України*, 1, 83–93]. https://doi.org/10.15407/visn2024.01.083

Broomandi, P., Guney, M., Kim, JR., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*, 12(21):9002. https://doi.org/10.3390/su12219002

Bull, J.W., & Woodford, C.H. (1998). Camouflets and their effects on runway supports. *Computer and Structures*, 69(6), 695–706.https://doi.org/10.1016/S0045-7949(98)00135-7

Chernogor, L.F. (2003). Physical processes in the near-earth environment associated with March–April 2003 Iraq war. *Space and Atmospheric Physics*, 9(2/3), 13–33. https://doi.org/10.15407/knit2003.02.013

Datsko, O., Zakharchenko, E., Butenko, Y., Melnyk, O., Kovalenko, I., Onychko, V. Ilchenko V., & Solokha, M. (2024). Ecological assessment of heavy metal content in ukrainian soils. *Journal of Ecological Engineering*, 25(11), 100–108. https://doi.org/10.12911/22998993/192669

Dytłow, S., & Górka-Kostrubiec, B. (2021). Concentration of heavy metals in street dust: An implication of using different geochemical background data in estimating the level of heavy metal pollution. *Environmental Geochemistry and Health*, *43*(1), 521–535. https://doi.org/10.1007/s10653-020-00726-9

Gao, L., Chen, H., Chen, G., & Deng, J. (2023). Particle Size Distributions and Extinction Coefficients of Aerosol Particles in Land Battlefield Environments. *Remote Sens.*, 15, 5038. https://doi.org/10.3390/rs15205038

Glasstone, S., & Dolan, P.J. (1977). *The Effects of Nuclear Weapons*. Third edition. United States Department of Defense and the Energy Research and Development Administration. https://www.deepspace.ucsb.edu/wp-content/uploads/2013/01/Effects-of-Nuclear-Weapons-1977-3rd-edition-complete.pdf

Gould, K.F., & Tempo, K. (1983) High-explosive field test. *Explosion Phenomena and Environmental Impacts*. Defense Nuclear Agency, Washington, DC 20305. https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA135737

Hlavatskyi, D., Menshov, O., Poliachenko, Ie., Bakhmutov, V., & Bondar, K. (2024). Comparison of magnetic and geochemical parameters in soil for the estimation of heavy metals pollution caused by warfare. International Conference of Young Professionals *"GeoTerrace-2024"*, 6–8 October 2024, Lviv, Ukraine. (pp. 1–5). http://dx.doi.org/10.3997/2214-4609.2024510067

Hupy, J.P., & Koehler, T. (2012). Modern warfare as a significant form of zoogeomorphic disturbance upon the landscape. *Geomorphology*, 157–158, 169–182. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.05.024.

Hupy, J.P., & Schaetzl, R.J. (2006). Introducing "bombturbation," a singular type of soil disturbance and mixing. *Soil. Science*, 171(11), 823–836. https://doi.org/10.1097/01.ss.0000228053.08087.19

Hurin, A.O., Beresnevych, P.V., Nemchenko, A.A., & Oshmanskyi, I.B. (2007). *Aerology of mining enterprises*. Kryvyi Rih: Publishing Center of Kryvyi Rih Technical University [in Ukrainian]. [Гурін А.О., Бересневич П.В., Немченко А.А., Ошманський І.Б. (2007). *Аерологія гірничих підприємств*. Видавництво Криворізького технічного університету].

Khotynenko, O.M. (2014). *Soil science with the basics of geology*. Lecture notes. Mykolaivskyi natsionalnyi ahrarnyi universytet, Mykolaiv. [in Ukrainian]. [Хотиненко О.М. (2014). *Ґрунтознавство з основами геології*. Конспект лекцій. Миколаївський національний аграрний університет, Миколаїв]. https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/2976/1/Hotinenko_O.GzOG_KL_2014.pdf

Kolesnik, V.Ye., Yurchenko, A.A., Litvinenko, A.A., & Pavlichenko, A.V. (2014). *Ways and means to enhance the environmental safety of massive explosions in quarries for iron dust factor. D: Litograf* [in Russian]. [Колесник В.Е., Юрченко А.А., Литвиненко А.А., Павличенко А.В. *Способи і засоби підвищення екологічної безпеки масових вибухів в залізорудних кар'єрах за пиловим чинником*. Літограф, 2014].

Kozlova, T., & Velikodsky, Yu. (2024). Deep Learning-Based Detection of Damaged Buildings in Satellite Imagery. International Conference of Young Professionals *"GeoTerrace-2024"*, Oct 2024, Volume 2024, (pp.1–5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510013

Kravchenia, V., Malik, T., Trofymenko, P., Samko, M., & Tsvyk, O. (2024). Inventory and assessment of agricultural landscapes damaged as a result of hostilities using remote sensing methods. International Conference of Young Professionals *"GeoTerrace-2024"*, Oct 2024, Vol. 2024, (pp. 1–5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510087

Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024b). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. *85th EAGE Annual Conference & Exhibition*, June 2024, Vol. 2024, (pp. 1–5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.202410637

Menshov, O., Bondar, K., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, Ie. (2024a). Magnetic mineralogical properties of Kyiv region soils, affected by war. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *3*(106), 5–12. [in Ukrainian]. [Меньшов, О., Бондар, К., Бахмутов, В., Главацький, Д., Поляченко, Є. Магнітно-мінералогічні властивості ґрунтів Київщини, уражених військовими діями. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(106), 5–12]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.01

Orlenko, L.P. [ed] (2002). *Physics of Explosion*. Fizmatlit [in Russian]. [Орленко, Л.П. [ред.] (2002). *Физика взрыва*. Физматлит].

Persson, P.A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). *Rock blasting and explosives engineering*. CRC Press, USA. https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781351418225_A37401424/preview-9781351418225_A37401424.pdf

Pittock, A.B., Ackerman, T.P., Crutzen, P.J., MacCracken, M.C., Shapiro, C.S., & Turco, R.P. (1990). *Environmental consequences of nuclear war: physical and atmospheric effects (SCOPE Series)*. (1), 392.

Savosko, V. (2016). *Heavy metals in soils at Kryvbas*. Dionat [in Russian]. [Савосько, В. (2016). *Тяжелые металлы в почвах Кривбасса*. Діонат].

Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(10), 1614. https://doi.org/10.3390/land13101614

Splodytel, A., Holubtsov, O., Chumachenko, S., & Sorokina, L. (2023). *The impact of Russia's war against Ukraine on the state of the country's soil. Analysis results*. Ecoaction – Centre for Environmental Initiatives. https://en.ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2023/05/impact-on-soil-russian-war.pdf

Technical rules for blasting operations on the daylight surface. (1972). Nedra [in Russian]. [*Технические правила ведения взрывных работ на дневной поверхности*. (1972). Недра].

Turner, R.E., Eitner, P.G., Leonard, C.D., & Snyder, D.G. (1980). *Battlefield environment obscuration handbook by Defense Technical Information Center. Volume I, ADA102822*. Science Applications Inc.: Ann Arbor, MI, USA. https://archive.org/details/DTIC_ADA1028225/DTIC_ADA1028225

Williams, O.H., & Rintoul-Hynes, N.L.J. (2022). Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle. *European Journal of Soil Science*, 73(4). https://doi.org/10.1111/ejss.13297

Yang, S., Chen, H., Gao, L., Qi, B., Guo, P., & Deng, J. (2021). Study of spatial distribution characteristics for dust raised by vehicles in battlefield environments using CFD. *IEEE Access*, 9, 48023-48038. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059068

Отримано редакцією журналу / Received: 04.12.24
Прорецензовано / Revised: 05.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Тарас БІЛИЙ[1], д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-6621
e-mail: belyit@gmail.com

Дмитро ГЛАВАЦЬКИЙ[1], канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Євген ПОЛЯЧЕНКО[1], канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

Галина МЕЛЬНИК[1], канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3609-1181
e-mail: melnykgv@gmail.com

Семен ЧЕРКЕС[1], асп., інж.
ORCID ID: 0000-0002-8304-7159
e-mail: semyoncherkes@gmail.com

Дмитро ЛІТВІНОВ[1], канд. фіз.-мат. наук, наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0003-0722-8171
e-mail: litvinovda.job@gmail.com

[1]Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

СТУПІНЬ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ ТА УТВОРЕННЯ АЕРОЗОЛІВ ІЗ ПРОДУКТІВ ВИБУХІВ УНАСЛІДОК БОЙОВИХ ДІЙ В УКРАЇНІ

В с т у п . ***На території України, де ведуться масштабні бойові дії, зосереджене промислове виробництво та розвинена транспортна інфраструктура, зокрема кожне десяте підприємство має підвищений (1-й чи 2-й) клас небезпеки. Не менших збитків від обстрілів та мінування зазнали орні поля, що негативно впливає на продовольчу безпеку у світі. Ступінь екологічної небезпеки території, на якій пройшли бойові дії, визначається насамперед рівнем приземних концентрацій забруднювальних речовин, що потрапляють у природне середовище. Концентрації, а також дальність і площа розсіювання забруднювачів залежать від параметрів вибуху, висоти підйому хмар продуктів вибуху та метеорологічних умов.***

М е т о д и . ***Для уражених війною ділянок запропоновано механізми оцінювання ступеня механічного пошкодження ґрунтів та потрапляння пилу від газопилової хмари в довкілля на основі методів, які використовують на гірничодобувних підприємствах для аналізу екологічної небезпеки.***

Р е з у л ь т а т и . ***Дослідження виконано безпосередньо в польових умовах, де ідентифіковано близько 1000 воронок різних діаметрів. За морфологічними формами воронок оцінено основні параметри вибуху: об'єм переміщеної (або зруйнованої) землі, маса аерозолю та пилу, що потрапила в атмосферу, ширина та висота навалу – розліт землі від центру вибуху. Розраховано висоту підняття газопилової хмари від потужних вибухів, що вкрай важливо для моделювання динаміки твердих частинок у хмарі та розв'язання задач регіонального переносу забруднення.***

Побудовано послідовний алгоритм для оцінювання руйнування та пошкодження ґрунтів і потрапляння аерозолю та пилу в атмосферу, який утворюється під час наземних вибухів.

В и с н о в к и . ***Запропоновано алгоритм розрахунків ступеня пошкодження ґрунтів та потрапляння пилу в атмосферу від артилерійської зброї різного калібру. Отримано розрахунки висоти підняття газопилової хмари від потужних вибухів та розльоту землі від воронки. Оцінено накопичувальну дію пошкодження ґрунтів та забруднення атмосфери речовинами продуктів вибуху за добу, місяць та рік. Результати порівняння завданої шкоди ґрунтам та викиди шкідливих речовин в атмосферу внаслідок війни мають зіставний масштаб з роботою середньостатистичного кар'єру в Україні за рік. Враховуючи масштаб лінії бойових зіткнень забруднення природного середовища матиме катастрофічні наслідки.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***російсько-українська війна, аерозоль, пил, деградація ґрунту.***

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/10.17721/1728-2713.108.06

Наталія РУСАЧЕНКО, асп.
ORCID ID: 0000-0002-7407-696X
e-mail: rusachenko_natasha@ukr.net
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 ШВИДКІСНИХ АНОМАЛІЙ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДИНАМІЧНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ СЕЙСМІЧНИХ ДАНИХ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СКЛАДНО ПОБУДОВАНИХ ГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ

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

Вступ. *Одним із пріоритетних завдань геофізики є виявлення скупчень вуглеводнів на ранній стадії розвідки, до буріння першої свердловини, коли доступні лише сейсмічні дані. Аналіз аномалій швидкості проходження пружних хвиль разом з результатами кількісної інтерпретації сейсмічних даних є додатковим інструментом оконтурення місць поширення порід-колекторів. Особливо це актуально для складно побудованих покладів у зонах соляних куполів Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ).*

Методи. *Коли порода насичена флюїдами, її щільність і швидкість поширення пружних коливань змінюються, що впливає на відбиття та проходження сейсмічних хвиль. Зміни в сейсмічних амплітудах і швидкостях вказують на ознаки присутності різних флюїдів, таких як нафта, газ або вода, тим самим допомагаючи в ідентифікації пластових флюїдів. Також опосередкованими діагностичними інструментами є AVO-аналіз та еластична інверсія.*

Результати. *Проаналізовано шість газових родовищ на території ДДЗ, які мають тотожні характеристики сейсмічного поля в межах газового покладу. Описано інтегральний вплив пористого насиченого пласта на амплітуди, частоти та швидкості поширення пружних хвиль.*

Висновки. *У результаті комплексного аналізу сейсмічних даних описано методику, яка дає змогу оцінити ключові характеристики колектора та в той же час виявити газові пастки або ділянки накопичення вуглеводнів, притаманних регіону ДДЗ.*

Ключові слова: *сейсмічна розвідка, обробка, швидкісна аномалія, інтерсепт, градієнт, кутові суми, AVO аналіз.*

Вступ

Гірські породи, з яких складається земна кора, значно різняться за пружними властивостями. Одні з них, до яких належать багато магматичних порід і сильно консолідованих осадових відкладів, близькі за своїми властивостями до ідеально пружних середовищ, інші, до яких відносять породи в ослаблених зонах і зонах тріщинуватості, а також пористі відклади, дуже помітно відрізняються від ідеально пружних середовищ. Гірські породи мають також низку інших суттєвих особливостей, таких як чітко виражена шаруватість, іноді помітна гетерогенність, мінливість пружних властивостей під дією різноманітних геологічних факторів. Тому важливо досліджувати швидкості пружних хвиль, їх спектральний склад та затухання сейсмічних хвиль у геологічному розрізі. Це є основою для прямого виявлення вуглеводнів, оскільки такі методи, як "яскрава пляма" та аналіз AVO (amplitude versus offset), використовують ці фізичні властивості. Ефективний підхід для раннього виявлення перспективних на газ товщ базується на аналізі динамічних параметрів та швидкостей проходження пружних хвиль через різноманітні геологічні середовища.

Першими почали досліджувати вплив природного газу на амплітуди сейсмічних хвиль і коефіцієнти відбиття на межі "газ – вода" в пористому піщаному колекторі Н. К. Датт та Х. Оде (1983). Використовуючи теорію Біота, автори показують, що потік в'язкого флюїду впливає на поведінку сейсмічних хвиль, що призводить до втрати енергії та зміни коефіцієнтів відбиття. Дослідження виявило, що на втрату сейсмічної енергії у газонасичених колекторах впливають частота та кут падіння сейсмічної хвилі на геологічне середовище, причому більші втрати відбуваються за вищих частот і більших кутів.

Широкий діапазон зміни швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах пояснюють впливом великої кількості одночасно діючих факторів геологічного та фізичного походження. Стаття (Pride, Berryman, & Harris, 2004) містить уніфіковану теоретичну основу для трьох механізмів загасання P-хвиль в осадових породах. Дослідження зосереджено на хвильовому аналізі впливу геологічних неоднорідностей на модулі пружності в мезоскопічних масштабах (більших за розміри зерен, але менших за довжину хвиль). Автори показують, що неоднорідності мезоскопічного масштабу, такі як літологічні варіації та осередки незмішуваних флюїдів, можуть спричинити значне загасання та розсіювання сейсмічних хвиль. Ця модель допомагає пояснити різні рівні втрат сейсмічної енергії, які спостерігаються на польових сейсмічних даних.

Однією з важливих проблем при оцінці колекторів є також врахування анізотропії, що призводить до багатьох неточностей в розрахунках глибини залягання відбиваючих горизонтів та оцінці параметрів насичення. У статті (Chapman, Liu, & Li, 2006) досліджується, як поклади вуглеводнів, що часто демонструють більш високе загасання амплітудно-частотних характеристик, впливають на AVO-аналіз. Для моделювання цих ефектів автори використовують теорію еквівалентного середовища, основану на концепції променевого потоку.

© Русаченко Наталія, Кузьменко Павло, Вижва Сергій, 2025

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

Виявлено, що коефіцієнт відбиття змінюється залежно від частоти, що впливає на поведінку AVO. Відбиття класу I (високоімпедансний пісковик) зсуваються до вищих частот, тоді як відбиття класу III (низькоімпедансний пісковик) підсилюють нижчі частоти. Синтетичні сейсмограми для матеріалів із частотно-залежними швидкостями та затуханням показують, що ці ефекти можна виявити на підсумованих сейсмічних розрізах.

Аналіз сейсмічних швидкостей не тільки з погляду їх поширення з глибиною, а й у латеральному напрямку дає змогу оцінити структурно-тектонічні та петрофізичні характеристики пласта. Л. Конг та ін. (2013) дослідили, як тріщини в породах впливають на поширення сейсмічних хвиль. Дослідження зосереджене на нелінійній взаємодії сейсмічних хвиль із тріщинами, що призводить до затухання (втрати енергії) і частотної дисперсії швидкості (зміна швидкості хвилі з частотою). Автори надають аналітичні рішення та експериментальні дані, щоб показати, що тріщини можуть суттєво впливати на поведінку сейсмічних хвиль, що є вирішальним для точної інтерпретації сейсмічних даних у тріщинуватих колекторах.

Стаття Х. Чжана та К. Іннанена (2017) під назвою "Частотно-залежне затухання та дисперсія швидкості сейсмічних хвиль внаслідок флюїдонасичення в пористих породах" досліджує, як викликаний сейсмічними хвилями потік рідини в пористих породах викликає затухання сейсмічної хвилі та дисперсію швидкості. Використовуючи кінцево-різницеве моделювання, автори показують, що неоднорідності мезоскопічного масштабу, такі як неоднорідна насиченість, призводять до значного частотно-залежного загасання та дисперсії. Дослідження демонструє, що ці ефекти можуть збільшувати коефіцієнт відбиття на низьких частотах, що часто спостерігається у породах-колекторах, насичених вуглеводнями.

Загальний аналіз дослідження методів локалізації пасток вуглеводнів на основі наведених вище літературних джерел показує, що науковці вивчали окремо швидкісні аномалії та результати кількісної інтерпретації сейсмічних даних. А комплексний підхід у ідентифікації вуглеводнів є частиною загальної проблеми, яка раніше не була розв'язана.

Метою даного дослідження є аналіз впливу низькошвидкісних аномалій на кількісні параметри хвильового поля та прогноз перспективних на вуглеводні ділянок на основі комплексного підходу, що включає аналіз швидкостей, динамічних характеристик сейсмічного сигналу та найбільш інформативних сейсмічних атрибутів.

Методи

До недавнього часу сейсмічна швидкість використовувалася лише для міграції сейсмічних даних і перетворення даних із часового домену в глибинний. Однак завдяки останнім новим технологіям, таким як повна інверсія форми хвилі (FWI), точність і детальність визначення сейсмічних швидкостей значно поліпшилася. Аналіз сейсмічних швидкостей дає змогу оцінити ключові характеристики колектора (пористість, насичення флюїдами, щільність) і в той же час з використанням інших атрибутів виявити ділянки покладів вуглеводнів.

Швидкості поширення поздовжніх і поперечних сейсмічних хвиль та коефіцієнти їх поглинання є основними кількісними параметрами, що визначаються за результатами обробки матеріалів польових сейсмічних досліджень. Ці параметри характеризують літологічний склад гірських порід у розрізі, їх стан, характер осадонакопичення в розрізі, властивості флюїдів, що заповнюють пори гірських порід та ін. Крім того, знання швидкостей поширення пружних хвиль завжди необхідне для визначення глибини залягання відбиваючих і заломлюючих границь та кутів їхнього нахилу.

Дослідження (Abdul, & Ghosh, 2014) показують, що газонасичена зона може бути ідентифікована на основі значно зменшеної амплітуди P-хвилі, що свідчить про наявність газу. Водночас наявність газових тіней на кінцевому зображенні чітко помітна в даних. Погане зображення в зоні, насиченій газом (рис. 1а), могло бути результатом значного ослаблення високочастотної складової та розсіювання енергії P-хвилі, що спричинило зменшення її швидкості (рис. 1б) під час її поширення через пустотний простір, насичений газом.

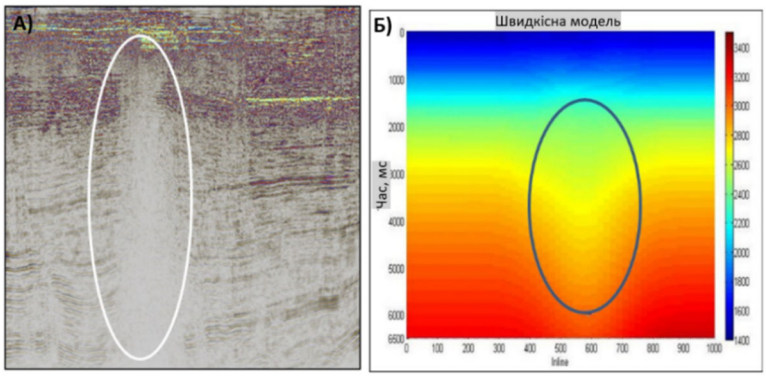


Рис. 1. А) сейсмічний розріз родовища газу, розташованого в шельфовій зоні Малайзії. Зона низької інтенсивності сейсмічного сигналу (позначено білим колом) утворилася внаслідок накопичення газу на приповерхневому шарі; **Б)** сейсмічна швидкісна модель, яка відповідає розрізу, показаному на рис. 1А. "Pull-down effect" можна побачити в межах чорного кола, що вказує на меншу швидкість у межах газової аномалії (Latiff, & Ghosh, 2014)

Комплексний аналіз сейсмічних даних є незамінним під час обробки та інтерпретації. Результати обробки сейсмічних даних інтегруються з матеріалами кількісної інтерпретації та аналізу динамічних характеристик швидкісного поля. Для комплексного аналізу сейсмічних даних найчастіше використовують набір параметрів, який включає: відношення V_p/V_s; відношення V_p/V_s, що представляє відношення швидкості хвилі стиснення (V_p) до швидкості хвилі зсуву (V_s) у геологічних середовищах, є важливим сейсмічним параметром. Співвідношення V_p/V_s – безрозмірна величина, яка використовується для визначення пружних властивостей гірських порід із

варіаціями, що вказують на зміни складу, пористості та вмісту рідини. Геофізики використовують це співвідношення для диференціації літології геологічних утворень, ідентифікації потенційних резервуарів і вдосконалення методів сейсмічної інверсії для моделювання геологічного середовища. Загалом співвідношення V_p/V_s відіграє важливу роль під час сейсмічних досліджень товщ, перспективних на вуглеводневі ресурси. Швидкості P-хвилі (об'ємного стиснення) і S-хвилі (зсуву) розраховуються за співвідношенням

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \text{ та } V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},$$

де k – об'ємний модуль (ГПа), μ – модуль зсуву (ГПа) та ρ – густина породи (кг/м^3), V – швидкість (м/с).

Хоча геологічне середовище не є ізотропними та однорідними, існує пружна еквівалентність у шаруватих середовищах, коли швидкості апроксимуються як інтервальна, середня та середньоквадратична. Співвідношення швидкостей (V_p/V_s) і акустичний опір (AI) можна виразити як

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{k}{\mu} + \frac{4}{3}} \text{ та } AI = V_p \cdot \rho .$$

Модуль об'ємної пружності, також званий нестисливістю, визначає загальну об'ємну жорсткість. Модуль зсуву, з іншого боку, визначає жорсткість матеріалу та описує його стійкість до деформації зсуву. Пісковики, що містять вуглеводні, демонструють зниження V_p (через значне зниження об'ємного модуля та помірне зниження густини), але невелике збільшення V_s (через зменшення об'ємної густини). Отже, сумарним ефектом є значно нижче співвідношення V_p/V_s у пісковиках насичених вуглеводнями. Це наочно показано на рис. 2.

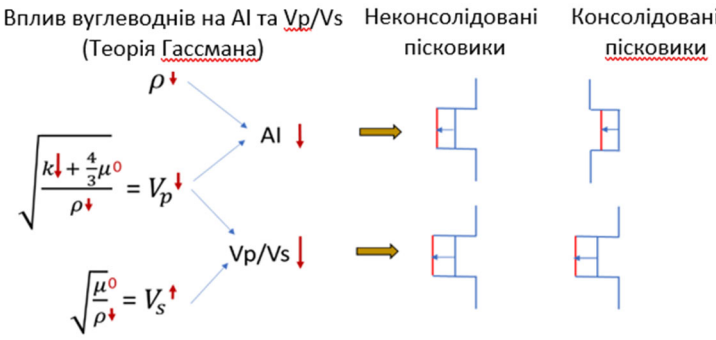


Рис. 2. Вплив вуглеводнів на AI та співвідношення V_p/V_s (Avseth, & Veggeland, 2015)

Аналіз AVO передбачає вивчення того, як змінюються амплітуди сейсмічних хвиль із зміною віддалення джерело-приймач. Інтерсепт та градієнт є параметрами в рівнянні лінійної відповідності амплітуди та виносу (AVO). Інтерсепт (A): представляє амплітуду при нульовому віддаленні. Градієнт (B): представляє нахил або швидкість зміни амплітуди зі зміщенням (градієнт лінійної відповідності):

$$A = \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta\rho}{\rho}\right);\ B = \frac{\Delta V_p}{2V_p} - 4k\left(\frac{\Delta V_s}{V_s}\right) - 2k\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right).$$

Оскільки існує взаємозв'язок між розташуванням точок на кросплоті інтерсепт-градієнт (A і B) і петрофізичними характеристиками шаруватої моделі "колектор–покрівля–підстельні породи", можна розробити на цій основі класифікацію AVO-аномалій. Зміщення точок, викликане зміною пружності породи-колектора, залежить від співвідношення акустичних імпедансів насиченого колектора і вмісних порід, яке визначає форму кривих на графіку рис. 3. Можливі варіанти можна розділити на чотири класи, які тяжіють до різних ділянок на кросплоті (рис. 3). Виділені класи наведено в табл. 1.

Аномалії або відхилення від очікуваної тенденції на крос-схемі можуть свідчити про наявність вуглеводнів (рис. 4). Класи AVO, такі як клас II (газовий пісковик) або клас III (пісковик зі значно пониженими значенням AI порівняно із вмісними породами), часто можна розрізнити на перехресних графіках інтерсепта та градієнта (Вижва та ін., 2019), (табл. 1).

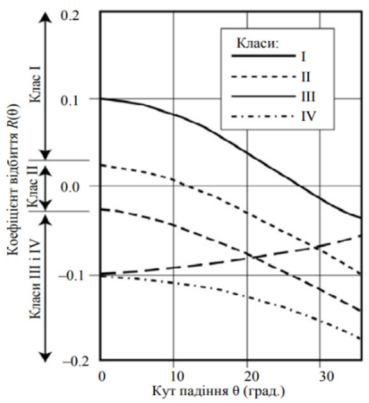


Рис. 3. Коефіцієнти відбиття плоских хвиль від покрівлі газонасиченого піщаного колектора залежно від співвідношення акустичних імпедансів колектора і глинистої покрівлі та класифікація AVO-аномалій

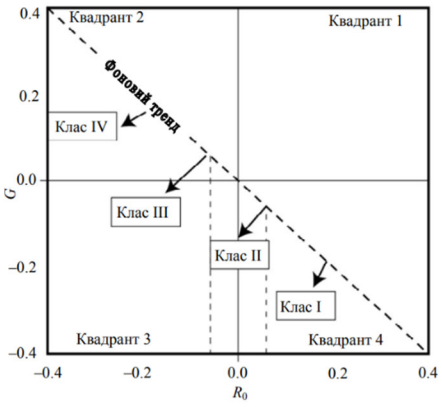


Рис. 4. Класифікація аномалій, зумовлених зменшенням акустичної жорсткості породи-колектора при відбитті хвилі від його покрівлі (стрілками показано флюїдні вектори)

Таблиця 1

Зміна ключових параметрів при 4-ступеневій AVO-класифікації

Клас	Акустичний імпеданс	Квадрант кросплота	A		Характер зміни амплітуди відбиття при зміні кута θ
I	Вищий, ніж у покрівлі пласта	4	+	–	Зменшується
II	Приблизно такий самий, як у покрівлі	2, 3 і4	+/–	–	Зменшується / зростає, може змінювати знак
III	Нижчий, ніж у покрівлі	3	–	–	Зростає
IV	Нижчий, ніж у покрівлі	2	–	+	Зменшується

Сейсмічні дані дають уявлення про динамічні зміни сейсмічних амплітуд щодо просторових координат. Цей інструмент є незамінним при обробці та інтерпретації сейсмічних даних, особливо в галузі розвідувальної геофізики. Заглиблення в його створення, переваги, використання та інтерпретацію відкриває всебічне розуміння його ключової ролі в отриманні цінної інформації про геологічне середовище.

Результати

Проведено комплексний аналіз покладів родовищ вуглеводнів, які розташовані в межах Машівсько-Шебелинського газоносного району. Промислово-продуктивними є відклади нижньо-пермського та верхньо-кам'яновугільного періоду. Більшість родовищ у цьому районі представлені масивно-пластовими покладами, які зазвичай обмежені соляними діапірами та диз'юнктивними порушеннями.

Під час аналізу родовищ помічено еквівалентний набір характеристик сейсмічного хвильового поля, швидкостей та результатів кількісної інтерпретації, які вказують на наявність газу. У межах одного літологічного горизонту швидкість проходження пружних хвиль змінюється залежно від його структурного положення. Зокрема відзначається зменшення швидкості у напрямку до склепінь підняттів. Також під час аналізу сейсмічних даних по досліджених родовищах ДДЗ було помічено інтегральний вплив пористого насиченого пласта на амплітуди, частоти та швидкості. Аналіз кубів після виконання пре-стек міграції дає змогу визначити target zones (цільові зони для буріння) для подальшого QI (quantitative interpretation) аналізу. Для всіх родовищ обробка та інтерпретація сейсмічних даних проводилась за подібним алгоритмом. На рис. 5–7 наведено приклади найбільш інформативних атрибутів та етапів обробки і геологічної інтерпретації сейсмічних даних на прикладі одного з родовищ Машівсько-Шебелинського газоносного району. На рис. 5 подано результати пре-стек часової міграції та відповідні куби сейсмічних швидкостей. На сейсмічних розрізах синя стрілка вказує на ділянку, перспективну на вуглеводні (область високоамплітудних горизонтів відбиття), відповідно в межах тієї ж ділянки спостерігається ефект пониження сейсмічних швидкостей, а у випадку б) – навіть локальна низькошвидкісна аномалія.

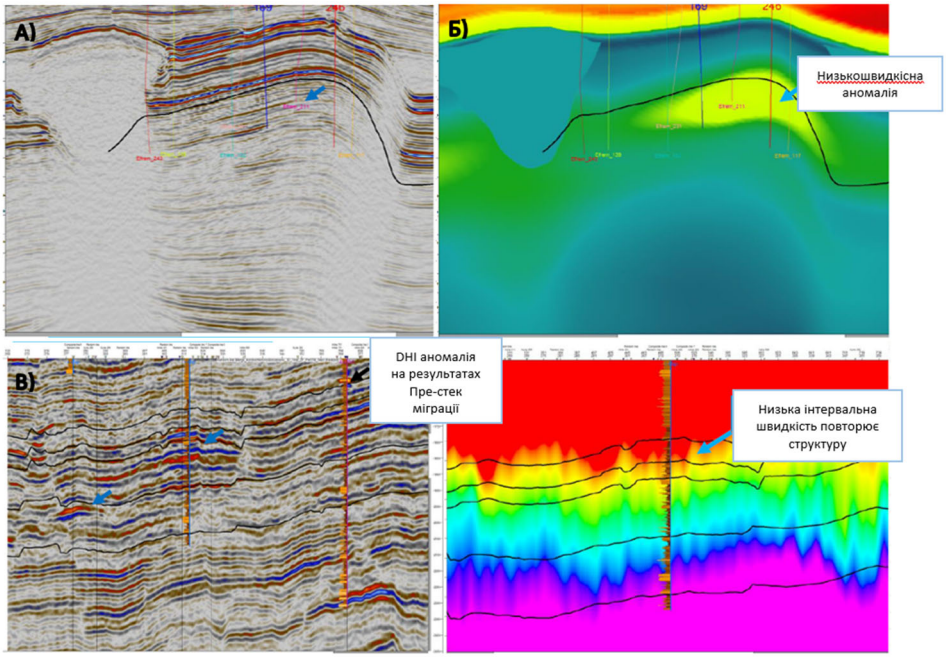


Рис. 5. Результати PreSTM міграції:
а), в) сейсмічні розрізи; б), г) сейсмічні швидкості

На сейсмічних даних аномалія типу "яскрава пляма" є індикатором вуглеводнів. Розріз середньоквадратичних швидкостей у даній ділянці характеризується пониженням швидкостей. Оскільки квазістатичні повільні S-хвилі розсіюються на набагато меншу відстань, ніж швидкі P-хвилі, і оскільки повільні S-хвилі призводять до втрати енергії з первинного (primary) хвильового поля, це перетворення є ефективним механізмом втрати енергії. Очевидно, чим більше генерується вторинних повільних хвиль, тим більше втрачається енергія первинної P-хвилі.

Швидкість P-хвилі зменшується для газовмісних пористих порід. Газонасичені товщі здебільшого лежать у межах значень V_P/V_S 1,4–1,62. Аналіз змін амплітуди зі збільшенням віддалень сейсмоприймачів дає цінну інформацію про наявність у розрізі газовмісних порід (рис. 6).

ISSN 1728-3817

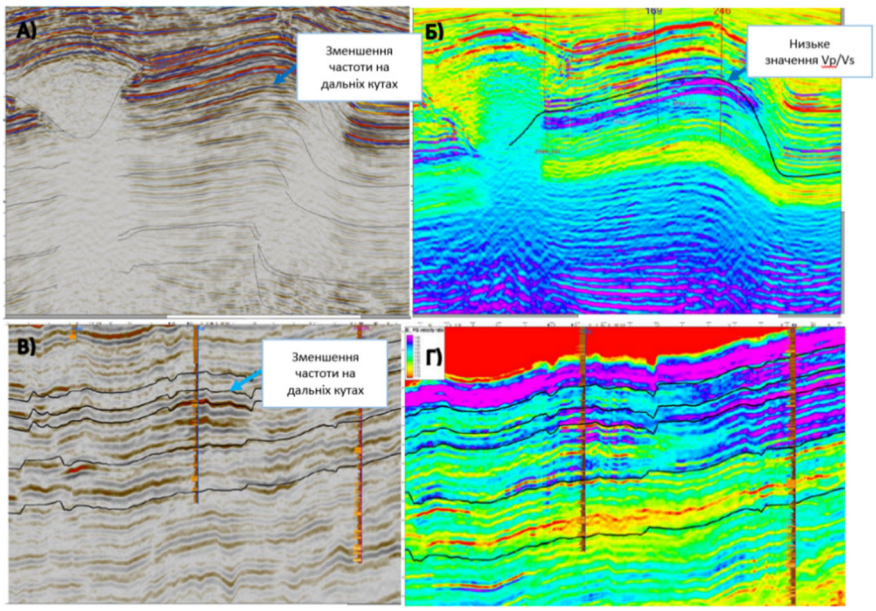


Рис. 6. Кутові суми з діапазоном
а) 26–35°, в) 34–46°; атрибут V_p/V_s б), г)

Наявність газу сильно впливає на фізичні властивості відкладів. Індикатор DHI (Direct hydrocarbon indicators) спричинений контрастом імпедансу між вищерозташованими газоносними відкладами та нижчезалеглими газоносними породами. Аналіз кутових сум на дальніх виносах показує пониження частот на дальніх кутах. Відповідно співвідношення V_p/V_s також має низькі значення в газонасиченій зоні.

Для повноцінної оцінки сейсмічних даних на предмет вуглеводневого насичення також проаналізовано AVO атрибут – добуток інтерсепта та градієнта та коефіцієнт Пуассона (рис. 7). Відношення V_p/V_s прямо пов'язане з коефіцієнтом Пуассона ν співвідношенням

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-v)}{1-2v}}.$$

Зміни амплітудних аномалій у сейсмічному полі пов'язані зі значними змінами відношення коефіцієнта Пуассона і виникають, якщо газонасичені породи замінюються водонасиченими. Властивості гірських порід, насичених газом чи нафтою, відображаються в амплітудах відбитих хвиль від таких порід (Михалевич та ін., 2021). В аналізі сейсмічних атрибутів цей параметр є загальноприйнятою технікою, яка використовується для отримання інформації про геологію надр і властивості гірських порід.

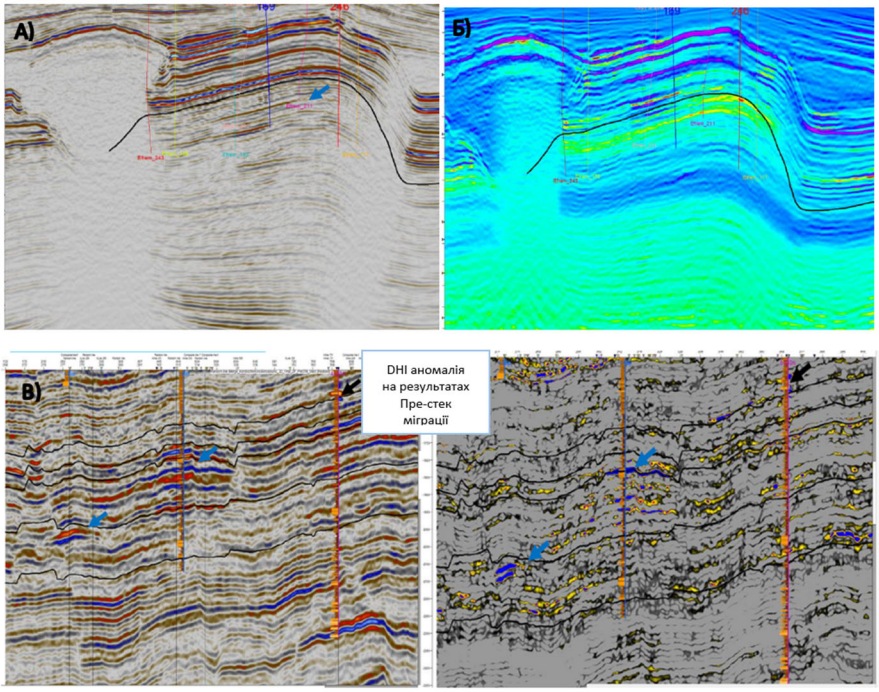


Рис. 7. Результати PreSTM міграції – а), в);
коефіцієнт Пуассона – б); атрибут інтерсепт * градієнт – г)

Один з ефективних способів аналізу колекторів базується на аналізі кросплотів атрибутів AVO, а саме градієнта та інтерсепта. Ці атрибути визначають пряму лінію $R(\sin^2\theta)$, де θ – кут нахилу відбитого сейсмічного променя, R – амплітуда відбитої хвилі. З використанням цих позначень формула градієнта може бути записана у такому вигляді: $G=\Delta R/\Delta\sin^2\theta$. А формула інтерсепта набуває вигляду I=R. Тобто фізичним змістом інтерсепта є амплітуда відбитої хвилі для нормального падіння. Визначення співвідношень між значеннями градієнта та інтерсепта дають можливість прогнозувати тип гірської породи, її фільтраційно-ємнісні властивості, а також тип флюїду, що її насичує (Вижва та ін., 2019).Результати аналізу атрибутів коефіцієнта Пуассона та добутка інтерсепт*градієнта підтверджують газоносність покладу та дають змогу віднести його до третього класу аномалій AVO (табл. 1). Третій клас AVO характеризується низьким імпедансом, але високою контрастністю імпедансу на межах розділу пластів. Від'ємні значення інтерсепта та градієнта вказують на зростання інтенсивності відбитих хвиль при збільшенні відстані між джерелами та приймачами. При цьому коефіцієнт відбиття залишається від'ємним. Цей клас AVO пов'язаний з класичними аномаліями коефіцієнтів відбиття, які мають негативні значення, або аномаліями у вигляді "яскравих плям".

Дискусія і висновки

Проведено комплексний аналіз кінематичних і динамічних параметрів сейсмічного хвильового поля та сейсмічних атрибутів на прикладі газових родовищ Машівсько-Шебелинському газоносного району, що представлені продуктивними горизонтами нижньо-пермського та верхньо-кам'яновугільного періоду. Використання інтегрованого підходу, що поєднує сейсмічні дані, характеристики хвильового поля (затухання, амплітуди) та атрибути AVO, дає змогу ідентифікувати перспективні зони для подальшої розробки та проаналізувати інтегральний вплив пористого насиченого пласта на амплітуди, частоти та швидкості. У дослідженні проілюстровано, що низькошвидкісні аномалії є індикаторами газонасичених пісковиків. Співвідношення Vp/Vs використовується для визначення пружних властивостей гірських порід із варіаціями, що вказують на зміни складу, пористості та типу флюїду. Відповідно, у статті аномальні значення Vp/Vs 1,4–1,62 тільки підтверджують, що низькошвидкісні зони (рис. 5) пов'язані з газовими аномаліями та значно відрізняються від літологічних аномалій та/або похибок при побудові швидкісної моделі. Інструменти кількісної інтерпретації, такі як сейсмоатрибутний аналіз та коефіцієнт Пуассона, дають додаткове уявлення про локалізацію газонасичених пластів. Добуток атрибутів "інтерсепт*градієнт" є основою для методів, таких як AVO-аналіз, який використовується для оцінки змін амплітуди сейсмічних хвиль залежно від кута падіння. Це дозволяє більш точно визначати властивості геологічного середовища і поліпшувати точність геологічних моделей. Отже, використання комплексного аналізу динамічних атрибутів сейсмічних даних дає змогу отримати якісно нову інформацію за рахунок дослідження швидкісних аномалій, кутових сум з діапазоном дальніх виносів, співвідношення Vp/Vs та AVO атрибутів, що, у свою чергу, зменшує ризики при бурінні та оптимізує витрати, оскільки фахівці можуть зосередитися на найбільш перспективних ділянках. Таким чином, комплексний підхід до аналізу сейсмічних даних не лише підвищує ефективність пошуку вуглеводнів, але й сприяє більш раціональному використанню ресурсів, що є критично важливим для успішної розробки газових родовищ у регіоні.

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

Список використаних джерел

Avseth, P., & Veggeland, T. (2015). Seismic screening of rock stiffness and fluid softening using rock-physics attributes. Interpretation, 3, SAE85-SAE93. https://doi.org/10.1190/INT-2015-0054.1

Chapman, M., Liu, E., & Li, X.-Y. (2006). The influence of fluid sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis. Geophysical Journal International, 167(1), 89–105. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02919.x

Dutta, N. C., & Odé, H. (1983). Seismic reflections from a gas-water contact. GEOPHYSICS, 48, 148–162. https://doi.org/10.1190/1.1441454

Kong, L., Gurevich, B., Müller, T. M., Wang, Y., & Yang, H. (2013). Effect of fracture fill on seismic attenuation and dispersion in fractured porous rocks. Geophysical Journal International, 195(3), 1679–1688. https://doi.org/10.1093/gji/ggt354

Latiff, A. H., & Ghosh, D. (2014). A Hybrid Approach for Subsurface Illumination Analysis in Shallow Gas Region: A Case Study in Malay Basin.

Pride, S., Berryman, J., & Harris, J. (2004). Seismic attenuation due to wave-induced flow. Journal of Geophysical Research, 109, B01201. https://doi.org/10.1029/2003JB002639

Telesto Energy. (n.d.). Compressional to shear velocity ratio. https://www.telestoenergy.com/compressional-to-shear-velocity-ratio/

Zhang, H., & Innanen, K. A. (2017). Frequency dependent attenuation and dispersion in patchy saturated porous rocks. *GeoConvention 2017*.

Вижва, С., Соловйов, І., Круглик, В., & Лісний, Г. (2019). Використання технології інтерактивної класифікації геологічних тіл для прогнозування покладів газу на сході України. *Вісник Київського ун-ту. Геологія*, 84(1), 70–76. https://doi.org/10.17721/1728-2713.84.10

Михалевич, І. Л., Кузьменко, П. М., Тищенко, А. П., Вижва, А. С., & Вижва, С. А. (2021). Виділення пасток неструктурного типу у межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини за даними AVO-аналізу та сейсмічної інверсії. *Геофизический журнал*, 43(2), 227–235. http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001306568

References

Avseth, P., & Veggeland, T. (2015). Seismic screening of rock stiffness and fluid softening using rock-physics attributes. *Interpretation*, 3(3), SAE85-SAE93. https://doi.org/10.1190/INT-2015-0054.1

Chapman, M., Liu, E., & Li, X.-Y. (2006). The influence of fluid sensitive dispersion and attenuation on AVO analysis. *Geophysical Journal International*, 167(1), 89–105. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.02919.x

Dutta, N. C., & Odé, H. (1983). Seismic reflections from a gas-water contact. GEOPHYSICS, 48(2), 148–162. https://doi.org/10.1190/1.1441454

Kong, L., Gurevich, B., Müller, T. M., Wang, Y., & Yang, H. (2013). Effect of fracture fill on seismic attenuation and dispersion in fractured porous rocks. Geophysical Journal International, 195(3), 1679–1688. https://doi.org/10.1093/gji/ggt354

Latiff, A. H., & Ghosh, D. (2014). *A Hybrid Approach for Subsurface Illumination Analysis in Shallow Gas Region: A Case Study in Malay Basin*.

Mikhalevych, I. L., Kuzmenko, P. M., Tyshchenko, A. P., Vyzhva, A. S., & Vyzhva, S. A. (2021). Identification of nonstructural type traps with in the limits of northern side of Dnieper-Donets depression according to the data of avo analysis and seismic inversion. *Geophysical Journal*, 43(2), 227–235. http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001306568

Pride, S., Berryman, J., & Harris, J. (2004). Seismic attenuation due to wave-induced flow. *Journal of Geophysical Research*, 109(B1), B01201. https://doi.org/10.1029/2003JB002639

Telesto Energy. (n.d.). *Compressional to shear velocity ratio*. https://www.telestoenergy.com/compressional-to-shear-velocity-ratio/

Vyzhva, S., Solovyov, I., Kruglyk, V., & Lisny, G. (2019). Use of the technology of interactive classification of geological bodies for gas deposits forecasting in eastern Ukraine. *Bulletin of the Kyiv University. Geology*, 84(1), 70–76. https://doi.org/10.17721/1728-2713.84.10

Zhang, H., & Innanen, K. A. (2017). Frequency dependent attenuation and dispersion in patchy saturated porous rocks. *GeoConvention 2017*.

Отримано редакцією журналу / Received: 23.11.24
Прорецензовано / Revised: 08.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Nataliia RUSACHENKO, PhD Student
ORCID ID: 0000-0002-7407-696X
e-mail: rusachenko_natasha@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Pavlo KUZMENKO, PhD (Geol.), Assoc. 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: s.vyzhva@knu.ua;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF VELOCITY ANOMALIES AND RESULTS OF SEISMIC DATA DYNAMIC INTERPRETATION IN THE STUDY OF COMPLEX GAS RESERVOIRS

Background. ***One of the priority tasks of geophysics is to detect hydrocarbon accumulations at an early stage of exploration, before drilling the first well, when only seismic data are available. Analysis of elastic wave velocity anomalies together with the results of quantitative interpretation of seismic data is an additional tool for outlining the distribution of reservoir rocks. This is especially relevant for complex deposits in the salt dome zones of the DDB (Dnieper-Donetsk basin).***

Methods. ***When the rock is saturated with fluids, its density and elastic waves propagation velocity change, which affects the reflection and transmission of seismic waves. Changes in seismic amplitudes and velocities indicate signs of the presence of various fluids, such as oil, gas or water, thereby helping to identify reservoir fluids. Also, indirect diagnostic tools are AVO analysis and elastic inversion.***

Results. ***Six gas fields in the DDZ territory were analyzed, which have identical seismic field characteristics within the gas deposit. The integral influence of a porous saturated layer on the amplitudes, frequencies and propagation velocities of elastic waves was described.***

Conclusions. ***As a result of a comprehensive analysis of seismic data, a methodology was described that allows assessing the key characteristics of the reservoir and, at the same time, identifying gas traps or areas of hydrocarbon accumulation inherent in the DDB region.***

Keywords: ***seismic exploration, processing, velocity anomaly, intercept, gradient, angle stacks, AVO analysis.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у; 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 550.42:621.039
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.07

Петро ПІГУЛЕВСЬКИЙ[1], д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ua.fm

Михайло ДОВБНІЧ[2], д-р геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-9167-4630
e-mail: dovbnichm@gmail.com

Олег ТЯПКІН[2], д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-2345-8343
e-mail: tiapkin.oleh@gmail.com

Ольга МЕДВЕДЄВА[3], д-р техн. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-5575-713X
e-mail: medvedevaolga1702@gmail.com

Лариса АНІСІМОВА[3], канд. біол. наук
ORCID ID: 0000-0003-3398-5400
e-mail: lanisimova@gmail.com

[1]Інститут геофізики ім.С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна
[2]Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна
[3]Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

КУМУЛЯТИВНИЙ ВПЛИВ ГІРНИЧОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА НА ГІДРОГЕОХІМІЧНИЙ СТАН ТЕРИТОРІЇ (НА ПРИКЛАДІ ПІВДЕННОГО КРИВБАСУ)

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

В с т у п . *Південний Кривбас є однією з найбільш промислово навантажених територій південного сходу України Техногенні зміни навколишнього середовища стають незворотними, що впливає на довкілля, особливо на ґрунти. У представлених дослідженнях виконано узагальнювальний аналіз рухливості основних хімічних елементів, що додатково забруднюють територію, прилеглу до гірничодобувних підприємств, унаслідок сільськогосподарської діяльності та визначення ступеня впливу міграції відповідних хімічних елементів на геохімічний стан ґрунтів, поверхневих і підземних вод.*

М е т о д и . *Для визначення ступеня та характеру техногенних змін у геоекологічному стані півдня Кривбасу застосовано методику порівняльно-статистичного аналізу узагальнення результатів попередніх гідрогеохімічних досліджень впливу гірничої промисловості та сільського господарства на основні компоненти довкілля.*

Р е з у л ь т а т и . *У результаті спільної дії факторів промислової та сільськогосподарської діяльності за тривалий час сформувалися нові стійкі природно-техногенні геосистеми. Основними забруднювачами ґрунту, підземних і поверхневих вод та донних відкладень у гірничодобувних регіонах є відходи гірничодобувної промисловості та сільськогосподарські добрива. Порівняння основних забруднювачів, які є результатом гірничодобувної та сільськогосподарської діяльності, показує, що забруднювальні компоненти значною мірою однакові. Це зокрема призводить до необґрунтованого перебільшення результатів гірничодобувної діяльності в загальному забрудненні прилеглих сільськогосподарських територій. Показано, що для розмежування небезпечного впливу (внеску) гірничодобувної промисловості та аграрного комплексу в забруднення території окремого регіону недостатньо виключно традиційних геохімічних даних. Необхідно додаткове просторово-часове (моніторингове) геолого-геофізичне дослідження як джерел, так і шляхів поширення окремих видів забруднення. Водночас визначальну роль в оцінці геоекологічного стану території досліджень мають структурно-тектонічні особливості, для параметризації яких потрібно використання відомих уявлень про системи докембрійських розломів, встановлених за комплексом геолого-геофізичних даних.*

В и с н о в к и . *Зроблено висновок про значний вплив міграції окремих хімічних елементів на геохімічний стан ґрунтів, поверхневих і підземних вод на прилеглих до гірничодобувних підприємств сільськогосподарських територіях. Наявність просторово-глибинної геолого-геофізичної інформації про особливості тектонічної (розломно-блокової) будови є однією з основ для розробки методики розмежування елементів небезпечного впливу гірничої промисловості та аграрного комплексу у формуванні загального геоекологічного стану конкретного регіону.*

К л ю ч о в і с л о в а : *відходи гірничодобувної промисловості, геолого-геофізична інформація, гідрогеохімія, добрива, рухомі форми хімічних елементів, розломи земної кори, тектонічна будова, хімічне забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод.*

Вступ

Нині в Україні розробляється понад 50 % наявних запасів так званих бідних залізних руд. Багаті руди, які становлять понад 43 % усіх розвіданих запасів руд, можуть використовуватися в металургії без збагачення, оскільки середній вміст заліза в них сягає 57,6 %. Але їх розробка – це лише ~40 % всього видобутку і не забезпечує потреби вітчизняної металургії, що зумовило розробку бідних руд залізистих кварцитів Криворізького залізорудного басейну (Кривбасу), які легко збагачуються. Тут розробку залізорудних родовищ здійснюють гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК) як відкритим, так і підземним способами. Особливістю цих ГЗК є те, що вони розташовані на території м. Кривий Ріг, де відсутні вільні ділянки землі для додаткового складування відходів збагачення (Багрій, Блінов, & Бєлокопитова, 2002; Багрій, Гожик, & Самоткал, 2005; Довгий, Коржнев, & Трофимчук, 2017; Довгий та ін., 2021). Особливо негативний вплив на довкілля тут чинять саме підприємства з видобутку та збагачення залізної руди, де більша частина видобутої сировини перетворюється на накопичувальні та забруднювальні відходи. На земельній ділянці площею понад 5 тис. га зосереджено понад 3 млрд м^3 гірничої маси. Відвали та сховища відходів збагачення, крім виведення з господарського обороту величезних земельних площ, створюють довготривалий негативний вплив

© Пігулевський Петро, Довбніч Михайло, Тяпкін Олег, Медведєва Ольга, Анісімова Лариса, 2025

ISSN 1728-3817

на довкілля. Частково розв'язанню цих проблем сприяють рекультивація відвалів і сховищ відходів збагачення та утилізація відходів гірничого виробництва, які проводяться поки що в недостатніх масштабах (Рудько, & Яковлєв, 2018: Коржнев, & Малахов, 2012; Шапар, Скрипник, & Міхєєв, 2018). У той же час гірничодобувні підприємства часто межують із сільськогосподарськими угіддями, де внаслідок внесення добрив і обробки рослин пестицидами у ґрунт потрапляють хімічні елементи різного ступеня небезпеки. Таким чином, в умовах Центральної та Південно-Східної України основними забруднювачами ґрунтів та підземних і поверхневих вод є не тільки відходи гірничодобувної промисловості, а й засоби хімізації сільського господарства (добрива, пестициди). Техногенні зміни навколишнього середовища стають незворотними. Компоненти довкілля, особливо ґрунти, втрачають здатність до природного самовідновлення. Унаслідок спільної дії факторів промислової (насамперед гірничодобувної) та сільськогосподарської діяльності за тривалий час сформувалися нові стійкі природно-техногенні геосистеми. У цих системах найбільш уразливими елементами є саме поверхневі та підземні води, а також зона аерації. Проте слід зазначити, що у зв'язку із загальним спадом промислового виробництва в Україні за останні десятиліття відбулося відповідне значне зменшення кількості забруднювальних стічних вод. У контексті цього зменшення негативного впливу на довкілля гірничодобувної промисловості актуальним стає питання розробки методики виділення впливу (зростаючої частки/внеску) сільськогосподарського комплексу в сумарне забруднення окремої території. Для вирішення цього геоекологічного питання недостатньо залучення традиційних геохімічних даних. Необхідна розробка локальних систем геоекологічного моніторингу гірничодобувних підприємств з прилеглими сільськогосподарськими землями – як інформаційної системи підтримки необхідних управлінських рішень щодо раціонального природокористування в умовах наявності як промислових, так і сільськогосподарських джерел забруднення основних компонентів довкілля. У рамках цієї проблеми набуває значення просторово-часове геолого-геофізичне дослідження не тільки самих джерел, а й шляхів поширення окремих видів забруднення, у т. ч. з урахуванням структурно-тектонічних особливостей територій. На прикладі Південного Кривбасу розглянемо деякі аспекти вирішення цих питань.

Методи

Для визначення ступеня та характеру техногенних змін у геоекологічному стані півдня Кривбасу застосовано методику порівняльно-статистичного аналізу раніше отриманих результатів гідрогеохімічних досліджень впливу гірничої промисловості та сільського господарства на основні компоненти довкілля. Як вихідні дані використано результати відповідних досліджень із відкритих літературних джерел та результати детальних геохімічних і гідрохімічних досліджень території Південного Кривбасу 2010–2019 рр.

Теоретична частина. Основні забруднювальні та токсичні елементи, що надходять у прилеглі ґрунти гірничих (залізорудних) підприємств (Губіна, & Горлицький, 2010; Anisimova L., Babyi K., & Pihulevskyi, 2022), наведено в табл. 1. Зокрема постійними домішками (у незначних кількостях) у залізистих кварцитах і багатих залізних рудах Кривбасу є фосфор та сірка. Постійними супутніми мікроелементами є Cr (4,7–78,7 мг/кг), Mn (1,9–198,34 мг/кг) і Ge (0,2–9,0 мг/кг), а також Cu, Zn і Ni.

Оскільки гірничодобувні підприємства Кривбасу межують із сільськогосподарськими угіддями, то при внесенні добрив і засобів захисту рослин у ґрунт потрапляють хімічні елементи різного ступеня небезпеки. Вони мігрують у підземні водоносні горизонти (переважно перший безнапірний), а потім у поверхневі води, що призводить до їх забруднення. При цьому внаслідок змиву шкідливих компонентів із водозбірної площі забруднювальні речовини можуть потрапляти безпосередньо у поверхневі води. Узагальнені дані про основні забруднювачі територій агропромислового комплексу наведено в табл. 1. Агропромисловий комплекс може значно збільшити техногенне навантаження на території поблизу гірничодобувних підприємств. Узагальнену інформацію про сільськогосподарські джерела забруднення ґрунтів (International..., 1992) наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Основні забруднювальні елементи територій унаслідок виробничої діяльності гірничодобувної промисловості та агропромислового комплексу – однакові елементи-забруднювачі (зелені), різні – (жовті)

Комплекси	Основні забруднювачі										
гірничодобувний	P	Mn	Cu	Cr	Pb	Zn	Co	Ge	Ni	Ti	Sn
агропромисловий	P	Mn	Cu	Cr	Pb	Zn	Cd	As	F	Hg	Sr

Таблиця 2

Узагальнена інформація щодо сільськогосподарських джерел забруднення ґрунтів

Хімічний елемент	Шляхи надходження, мг/кг					
	при поливі стічними водами підприємств	з фосфорними добривами	з вапняком	з азотними добривами	з органічними добривами	з пестицидами
As	2–26	2,0–1200	0,1–24,0	2,2–120	3–25	22–60
Cd	2–1500	0,1–170	0,04–0,1	0,05–8,5	0,3–0,8	-
Co	2–260	1–12	0,4–3,0	5,4–12	0,3–24	-
Cr	20–4060	66–245	10–15	3,2–19	25,2–55	-
Cu	50–3300	1–300	2–125	1–15	2–60	15–50
F	2–7	850–3800	300–740	-	-	18–45
Hg	0,1–55	0,01–1,2	0,05	0,3–2,9	0,09–0,2	0,8–42
Mn	60–3900	40–2000	40–1200	-	30–550	-
Mo	1–40	0,1–60	0,1–15	1–7	0,05–3	-
Ni	16–5300	7–38	10–20	7–34	7,8–30	-
Se	2–9	0,5–25	0,08–0,1	-	2,4	-
Pb	50–3000	7–225	20–1250	2–27	6,6–15	60
Sn	40–700	3–19	0,5–4	1,4–16	3,8	-
Zn	700–4900	50–1450	10–450	1–42	15–250	1,3–25

Порівнюючи основні забруднювачі, що є результатом гірничодобувної та сільськогосподарської діяльності (табл. 1), можна побачити, що забруднювальні компоненти значною мірою однакові. Це іноді призводить до необґрунтованого перебільшення результатів гірничодобувної діяльності в загальному забрудненні прилеглих сільськогосподарських територій. Тому в умовах техногенно навантажених територій, насичених гірничодобувними, промисловими та сільськогосподарськими комплексами, транспортними мережами та накопиченими промисловими і побутовими відходами, актуальним є виявлення джерел і шляхів міграції токсичних речовин і важких металів, у тому числі і в ґрунтовий покрив (Menshov, & Sukhorada, 2012; Tonkha et al., 2020).

Результати

Південний Кривбас є однією з найбільш технічно навантажених територій південного сходу України (див. рис. 1). За попередніми результатами геохімічних досліджень протягом 2010–2019 рр. вміст P, Pb, Zn, Co, Ni, Cu, Cr, V, Mn у чорноземному ґрунті цього регіону практично не змінюється (Pihulevskyi et al., 2019; Рудько, & Яковлєв, 2018). Низькі значення вмісту рухомих форм хімічних елементів, а також стабільність їх загального вмісту в ґрунті може свідчити про наближення до повної насиченості ґрунтів цими елементами. Валовий вміст перелічених хімічних елементів на цій території як на об'єктах гірничодобувних підприємств (у т. ч. хвостосховищ і відвалів), так і на значній відстані від них, мають однакові межі зміни вмісту цих елементів. Це свідчить про спільне забруднення цієї території гірничодобувним та агропромисловим комплексами. Останнє збільшує техногенне навантаження, оскільки лише 30–60 % добрив, що вносяться в ґрунт, використовуються рослинами, а 40–70 % з них потрапляють у навколишнє середовище, збільшуючи його забруднення. Водночас 20–30 % цих речовин залишається в ґрунті, у тому числі 10–15 % зв'язується ґрунтовою вологою, а 28–40 % – у газоподібному стані потрапляє із ґрунту в поверхневі шари атмосфери. Від випаровування вологого ґрунту об'ємом 100 м^3 втрачається до 23,3 кг азоту (або 30 кг NH_3), внесеного на поля з мінеральними добривами. З полів на прилеглі території виноситься близько 1,8 % мінеральних добрив. При зрошенні схилових земель у водойми з них вимивається до 20 % азоту, 2–5 % фосфору і 10–17 % калію із внесеної кількості мінеральних добрив.

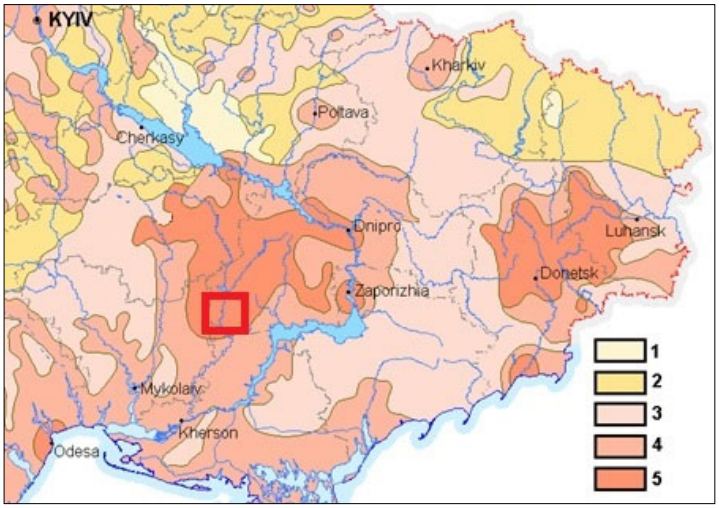


Рис. 1. Положення Південного Кривбасу (червоний контур) на карті екологічної ситуації Південного Сходу України (електронна версія Атласу України, Інститут географії НАН України, 1999–2000).

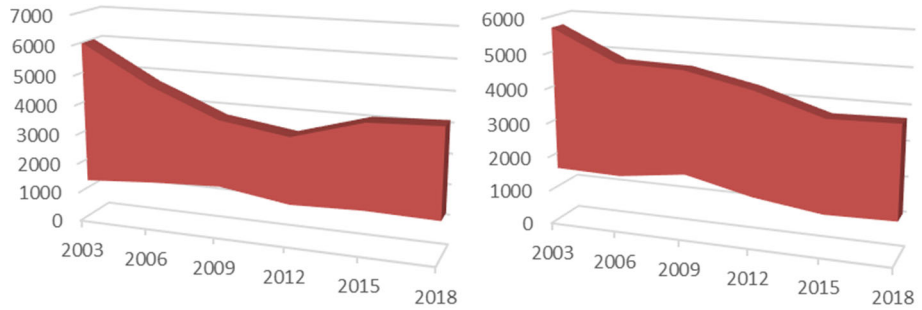
Умови життя населення: 1 – сприятливі, 2 – помірно сприятливі, 3 – задовільні, 4 – погіршені, 5 – важкі

Наближення до повного насичення хімічними елементами ґрунту призводить до того, що нова порція шкідливих елементів, отримана з неоптимально внесеними добривами, може вільно мігрувати в перший водоносний горизонт і внаслідок змиву з водозбірної площі з часом потрапляти в поверхневі водотоки. Так, на території дослідження елементи (P, Pb, Zn, Co, Ni, Cu, Cr, V та Mn) із "хвостосховищ" великих гірничодобувних підприємств Південного Кривбасу (ПАТ "Південний ГЗК" та ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг") можуть мігрувати до р. Інгулець, що поєднується із забрудненням агропромислового комплексу. Це підтверджується відсутністю змін у вмісті елементів P, Cr, Mn та Cu (які є "звичайними" забруднювачами гірничодобувного та агропромислового комплексів) у цій річці вище та нижче від потенційного скиду із цих хвостосховищ. На фоні зниження мінералізації води загалом по річці Інгулець з початку 2000 р. фіксуються рівні межі зміни мінералізації цієї річки вище і нижче від потенційного скиду води з хвостосховищ великих гірничодобувних підприємств Південного Кривбасу (див. рис. 2).

У контексті досліджень викликають зацікавленість результати спектрального аналізу донних відкладів р. Інгулець та р. Саксагань. Тут виокремлено групу пріоритетних елементів-забруднювачів: I класу небезпеки (Pb, Zn, Be, P, As, Se), II класу (Cr, Cu, Mo, Ni, Co, Bi, Li), та II клас (V, Mn) (Багрій та ін., 2005). Особливий інтерес становлять результати дослідження варіацій вмісту миш'яку, який поширений у басейні р. Інгулець. Цей хімічний елемент не належить до основних забруднювачів гірничодобувної промисловості – основним джерелом його надходження є добрива, що вносяться в ґрунт протягом вегетаційного періоду. Про це свідчить перевищення його вмісту (2,7–3,5 ГДК) у літній вегетаційний період на відміну від зимового, а також перевищення ГДК у донних відкладеннях за вмістом миш'яку в р. Бокова (7,5 ГДК, с. Валове,) та р. Боковенька (6,5 ГДК, с. Великофедірівка). Особливо слід підкреслити, те що вважається – ці поселення перебувають поза зоною значного впливу гірничодобувної промисловості. У р. Інгулець у районі с. Латівка зафіксовано 4-кратне перевищення ГДК за вмістом миш'яку в донних

відкладах та перевищення його фонових значень за вмістом Zn, Mo та Bi відповідно – у 2,9, 2,2 та 2,0 раза. Також слід відзначити, що молібден (який не зустрічається в асоціації із залізною рудою), як і миш'як, є повсюдним у донних відкладеннях усього річкового басейну із 5-кратним перевищенням своїх фонових значень. Його надходження в ґрунт з фосфорними добривами становить 0,1–60 мг/кг сухого ґрунту, з азотними добривами – 1–7 мг/кг сухого ґрунту, з вапняковими – 0,1–15 мг/кг сухого ґрунту. Усе це може свідчити на користь значного забруднення поверхневих вод саме через діяльність агропромислового комплексу.

Коефіцієнти кореляції між вмістом хімічних елементів у ґрунті не мають певного позитивного чи негативного сталого зв'язку (табл. 3). Вміст Si в ґрунті пов'язаний з V, джерелом якого у ґрунті є гірські породи залізорудних родовищ, що підтверджується наявністю його "генетичного" зв'язку з Mn, Ni та відсутністю такого зв'язку з P, Zn, Cu, Pb. Джерелом Mn також є переважно гірські породи залізорудних родовищ, що підтверджується наявністю зв'язку з Cr, V, Ni та Fe. Те саме стосується і вмісту Ni в ґрунті, зумовленому в основному його внесенням з родовищ залізної руди. Це підтверджується наявністю генетичного зв'язку між Ni і Cr, Fe, Mn, V і відсутністю такого зв'язку з Zn, Pb, Cu і P.



а б

Рис. 2. Зміна мінералізації в р. Інгулець (у мг/дм^3) вище (а) та нижче (б) від потенційного скиду води із хвостосховищ великих гірничодобувних підприємств Південного Кривбасу (за даними ПАТ "Південний ГЗК" та ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг")

Таблиця 3

Коефіцієнти кореляції між валовими формами вмісту хімічних елементів у ґрунті Південного Кривбасу (вихідні дані ПАТ "Південний ГЗК" та ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг")

	Si	*P*	*V*	*Cr*	*Mn*	*Fe$_{заг}$*	*Co*	*Ni*	*Cu*	*Zn*	*Pb*
S	1	-0,17	0,24	-0,18	-0,55	-0,47	0,02	0,02	0,03	-0,16	-0,10
P	-0,17	1	-0,33	-0,06	-0,07	-0,28	0,07	-0,52	0,39	0,04	0,09
V	0,24	-0,33	1	0,20	0,31	-0,04	0,22	0,49	-0,44	-0,44	-0,52
Cr	-0,18	-0,06	0,20	1	0,16	0,11	-0,16	0,24	-0,09	0,07	0,11
Mn	-0,55	-0,07	0,31	0,16	1	0,58	-0,13	0,46	-0,28	-0,27	-0,22
Fe_2O_3	-0,47	-0,28	-0,04	0,11	0,58	1	-0,09	0,29	-0,15	0,18	0,24
Co	0,02	0,07	0,22	-0,16	-0,13	-0,09	1	0,07	0,32	0,17	-0,06
Ni	0,02	-0,52	0,49	0,24	0,46	0,29	0,07	1	-0,48	-0,09	-0,17
Cu	0,03	0,39	-0,44	-0,09	-0,28	-0,15	0,32	-0,48	1	0,28	0,31
Zn	-0,16	0,04	-0,44	0,07	-0,27	0,18	0,17	-0,09	0,28	1	0,87
Pb	-0,10	0,09	-0,52	0,11	-0,22	0,24	-0,06	-0,17	0,31	0,87	1

У той же час Cr переважно "асоціюється" з родовищами залізної руди та частково з добривами, про що свідчить його зв'язок з Mn, V, Ni та, частково, з Pb, а також відсутність асоціації з Co та Si. Також слід зазначити, що Fe має зв'язок із Zn, Pb, Ni, Mn через його можливе надходження в ґрунт із гірських порід залізорудних родовищ та з добривами. У разі постійного запилення залізорудних відвалів залізо "розтікається" по площі майже рівномірно. Добрива також повинні рівномірно розподілятись і вноситись у ґрунт. Під впливом опадів відбувається такий самий розподіл Fe по площі досліджуваної території, що зумовило властивий зв'язок Fe з Pb і Zn. До цього слід додати, що джерелами Co в ґрунті, як і Fe, можуть бути як залізорудні родовища, так і добрива, що підтверджується наявністю генетичної спорідненості з Zn, V і Cu.

Із удобренням ґрунту переважно пов'язані: фосфор (який має зв'язок із Pb, Cu та не має зв'язку з Fe, V та Ni), мідь (яка має зв'язок з Zn, Pb, Co, P і не має зв'язку з Fe, Mn, V, Ni), цинк (який має зв'язок з Co, Fe, Cu, Pb і не має зв'язку з Mn і V) та свинець (який має зв'язок з Fe, Cu і Zn та не має зв'язку з Ni, Mn та V).

Отже, джерелами надходження в ґрунт Si, V, Cr, Mn і Ni є переважно гірські породи залізорудних родовищ, а P, Cu, Zn і Pb – добрива. Fe і Co мають подвійну природу надходження в ґрунт. На підставі інформації про вміст хімічних елементів у поточних і накопичених (лежачих) відходах оцінено їх міграційну здатність із хвостосховищ до підземних вод. Кількість Mn та Cu у лежачих відходах зменшилась у рази порівняно з поточними відходами збагачення. Ці елементи з відходів гірничого виробництва не можуть суттєво впливати на забруднення значних агропромислових територій, враховуючи їх високу міграційну здатність. Тому слід вважати, що основним джерелом забруднення цими елементами цих територій є внесені в ґрунт добрива. Такі елементи, як Co, Pb, Zn і Ag, із сухих поверхонь хвостосховищ можуть потрапляти в ґрунт разом із пилом.

Сильній фіксації миш'яку при адсорбції частинками гідроксидів заліза перешкоджає конкуренція з боку інших оксоаніонів: P_3O_4, S_2O_4, Mo_2O_4 (Manning, & Goldberg, 1996; Jackson, & Miller, 2000). Тому у "фосфатованих" водах можна очікувати зниження "ефективності бар'єру" доти, поки миш'як не буде зафіксовано. Органічні

сполуки збільшують біодоступність миш'яку. Дослідження, проведені на гетиті -FeOOH, показали, що адсорбція миш'яку знижується в присутності гумінових і фульвокислот (Grafe, Eick, & Grossel, 2001). На адсорбцію впливають тип, щільність і кислотні функції органічних полімерів. Крім того, органічні молекули перешкоджають електростатичній взаємодії As (V) з поверхнею гетиту. Конкуренція органічних лігандів залежить від pH середовища. Водночас основним елементом, який міститься в ґрунті, є кремній. Чим більше силікатів, тим менше органічних речовин у ґрунті.

Наведені результати свідчать про те, що для розмежування небезпечного впливу (внеску) гірничодобувної промисловості та аграрного комплексу в забруднення території окремого регіону недостатньо виключно геохімічних даних. Необхідно додаткове просторово-часове вивчення як джерел, так і шляхів поширення окремих видів забруднення. Останнє є складною науково-прикладною проблемою, розв'язання якої вимагає розвитку як традиційних, так і нетрадиційних технологій діагностики як стану екосистем, так і динаміки антропогенного впливу на довкілля. Технології досліджень, що використовують комплекс геофізичних методів, дають змогу оперативно визначати їх стан і функціонування за малою кількістю параметрів. Перспективи ефективного застосування геофізичної інформації при розв'язанні складних геоекологічних задач визначаються передусім різноманіттям фізичних полів, що об'єктивно відбивають статику та динаміку природного середовища (будь-які просторово-часові зміни довкілля викликають появу аномалій геофізичних полів, що реагують або пов'язані з екологічним станом конкретної території через геолого-петрографічні, водно-фізичні, геохімічні, біологічні та інші характеристики) (Тяпкін, 2006).

Наявний позитивний досвід досліджень небезпечного геоекологічного впливу об'єктів гірничого виробництва на території Південного Кривбасу (де в результаті взаємодії природних геодинамічних і техногенних процесів відзначається високий рівень активізації небезпечних (Pigulevskiy, & Svystun, 2021) геоекологічних і насамперед гідрогеоекологічних процесів) з використанням комплексу геофізичних методів: граві-магніторозвідки, електророзвідки методом вертикального електричного зондування, а також дешифрування аеро- і космознімків (Pigulevskiy et al., 2016; Пігулевський, Тяпкін, & Свистун, 2018; Ivanik, Shevchuk, & Tustanovska, 2020). За результатами проведених комплексних геолого-геофізичних досліджень, що супроводжувалися геолого-гідрогеологічними спостереженнями та бурінням завірювальних свердловин, отримано геолого-геофізичні розрізи та результативні карти, зміни геоелектричних параметрів, побудовані 3D-моделі зміни геоелектричних параметрів по латералі і глибині. Зокрема визначено, що зміни значень уявного опору геологічного розрізу проходять не рівномірно і не тільки по площі, але й по глибині, що у свою чергу свідчить про наявність активної фільтрації як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках. При цьому визначальну роль в оцінці гідрогеоекологічного стану території досліджень мають структурно-тектонічні особливості, для параметризації яких можуть бути використані відомі уявлення про системи докембрійських розломів земної кори, які встановлено за комплексом геолого-геофізичних даних (Гінтов, 2004; Tiapkin, Pihulevskyi, & Dovbnich; Pihulevskyi, Kendzera, & Babiy, 2023). Загальновідомо, що особливості тектонічної (розломно-блокової) будови по суті визначають загальний геоекологічний стан будь-яких територій: до річок, мережа яких зумовлена системами тектонічних розломів, тяжіють населені пункти та великі промислові виробництва; до цих розломів приурочено абсолютну більшість родовищ корисних копалин, при експлуатації яких на перший план висуваються проблема раціонального природокористування та пов'язані з ними природоохоронні заходи та навіть встановлені взаємозв'язки напрямків поширення забруднення, спричиненого переміщенням повітряних мас, з особливостями (розломно-блокової) будови (Batur, & Babii, 2022; Semenenko, Medvedieva, & Biliaiev, 2022; Tiapkin, Pihulevskyi, & Dovbnich, 2017; Pihulevskyi, Tiapkin, & Anisimova, 2018). Загалом зазначена геолого-геофізична інформація, у т. ч. про особливості тектонічної (розломно-блокової) будови може бути однією з основ для розробки методики розмежування часток небезпечного впливу гірничої промисловості та аграрного комплексу у формування загального геоекологічного стану конкретного регіону.

Дискусія і висновки

На основі узагальненого аналізу основних елементів, що забруднюють територію внаслідок сільськогосподарської діяльності, встановлено значний вплив міграції відповідних хімічних елементів на геохімічний стан ґрунтів, поверхневих і підземних вод. Порівняння основних забруднювальних елементів, що створюють небезпеку в результаті діяльності гірничодобувного та агропромислового комплексу, свідчить про їх значну тотожність (у т. ч. P, Mn, Cu, Cr, PЬ, Zn). Це іноді призводить до необґрунтованого перебільшення "гірничого" внеску в загальне забруднення сільськогосподарських територій від суміжних гірничих об'єктів.

На прикладі Південного Кривбасу показано, що до основних забруднювачів ґрунтів цієї території, поряд з наслідками гірничодобувної діяльності, належать внесені добрива та пестициди. Зафіксоване тут забруднення поверхневих вод, і насамперед р. Інгулець, значною мірою може бути наслідком діяльності агропромислового комплексу. Тобто для підземних вод об'єкти як гірничого, так і сільськогосподарського комплексу можуть спричиняти забруднення елементами як різного, так й майже однакового ступеня небезпеки.

Для розв'язання проблем раціонального природокористування слід розмежовувати небезпечний вплив (внесок) гірничодобувної промисловості та аграрного комплексу в забруднення основних компонентів довкілля. Але для цього недостатньо виключно геохімічних даних. Потрібна розробка локальних систем геоекологічного моніторингу гірничодобувних підприємств з прилеглими сільськогосподарськими землями – як інформаційних геолого-геофізичних систем підтримки необхідних управлінських рішень щодо раціонального природокористування в умовах наявності як промислових, так і сільськогосподарських джерел з відповідними шляхами просторово-часового поширення забруднення основних компонентів довкілля.

Внесок авторів: Петро Пігулевський – концептуалізація, написання (перегляд і редагування), методологія; Михайло Довбніч – написання (оригінальна чернетка), програмне забезпечення, валідація даних, формальний аналіз; Олег Тяпкін – написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування), концептуалізація, методологія; Ольга Медведєва – написання (оригінальна чернетка), валідація даних; Лариса Анісімова – написання (оригінальна чернетка), валідація даних, формальний аналіз.

Список використаних джерел

Anisimova L., Babyi K., & Pihulevskyi P. (2022). Some hydrochemical features of water filtration sources from under the left-bank dumps. XVI International Scientific Conference *"Monitoring of Geological Processes*

and Ecological Condition of the Environment". 15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine. p. 5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580188

International Register of Potentially Toxic Chemicals, Global Environment Monitoring System, Monitoring and Assessment Research Centre Netherlands, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. (1992). UNEP. https://digitallibrary.un.org/record/161613

Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih Ukraine. III International Conference *"Essays of Mining Science and Practice" IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 970 (012004). 13. https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004

Grafe, M., Eick, M.J., & Grossel, P.R. (2001). Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goethite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science. Soc. Am. J.,* 65, 1680-1687. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1680

Ivanik, O. M., Shevchuk, V. V., & Tustanovska, L.V. (2020). *Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric nethod.* International Conference Geoinformatics 2020, 11–14 May, 2020. https://doi.org/10.17721/1728-2713.99.01

Jackson, B.P., & Miller, W.P. (2000). Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J.,* 64, 1616-1622. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451616x

Manning, B.A., & Goldberg, S. (1996). Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 121–131. DOI:10.2136/sssaj1996.03615995006000010020x

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 15–22.

Pigulevskiy, P., Svistun, V., Slobodyaniuk, S., & Kyryliuk, A. (2016). *Studying of modern flooding of southwestern part Krivbass by geophysical methods*. Geoinformatics 2016 – XVth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600477

Pigulevskiy, P.I., & Svystun, V.K. (2021). *Influence of technogenic objects on the development of landslides in the south of Kryvbass*. Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities. 20–23 September 2021, Odessa, Ukraine. P. 5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1018

Pihulevskyi, P., Svystun, V., & Tiapkin, O. (2019) Monitoring (2019). Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: 12–15 November 2019. Repeated geophysical researches of hazardous geoecological processes near mining waste storage facilities of southern Kryvbas. 262–272. Curran Associates, Inc.

Pihulevskyi, P., Tiapkin, O., & Anisimova, L. (2018). Prediction of the azimuths of dangerous emissions of radioactive wastes stores. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: Proceedings of XII International Scientific Conference. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580063

Pihulevskyi, P.H., Kendzera, O.V., & Babiy, K.V. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu,* 2, 5–10. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005

Semenenko, Ye.V., Medvedieva, O.O., & Biliaiev, N.N. (2022). Mathematical model for express evaluation of process of dust air pollution in tailing facility. *Геотехнічна механіка*, 162, 112–125. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2022_162_12

Tiapkin, O.K., Pihulevskyi, P.H., & Dovbnich, M.M. (2017). Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geoecological tasks by geophysical methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 15–22.

Tonkha, O., Menshov, O., Bykova, O., Pikovska, O., & Fedosiy, I. (2020). Magnetic methods application for the physical and chemical properties assessment of Ukraine soil. In XIV International Scientific Conference "*Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*", 1, 1–5.

Багрій, І.Д., Блінов, П.В., & Бєлокопитова, Н.А. (2002). *Геоекологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничодобувної галузі*. Фенікс.

Багрій, І.Д., Гожик, П.Ф., & Самоткал, Е.В. (2005). *Гідроекосистема Криворізького басейну – стан і напрямки поліпшення*. Фенікс.

Гинтов, О.Б. (2004). Зоны разломов Украинского щита. Влияние процессов разломообразования на формирование структуры земной коры. *Геофізичний журнал*, 26(3), 3–24.

Губіна, В.Г., & Горлицький, Б.О. (2010). *Залізовмісні відходи України: стан та перспективи використання.* Логос. https://doi.org/10.32782/geotech2024.38.02

Довгий, С.О., Іванченко, В.В., Коржнев, М.М., Трофимчук, О.М., & Яковлєв, Є.О. (2021). *Дослідження екологічного стану територій постмайнінгу в Україні на прикладі Криворізького басейну та його оточення*. Ніка-Центр. https://itgip.org › wp-content › uploads › 2021/12

Довгий, С.О., Коржнев, М.М., & Трофимчук, О.М. (2017). *Геологічна будова та сучасні геолого-економічні й екологічні умови видобутку і переробки залізних руд Криворізько-Кременчуцької зони*. Ніка-Центр. https://itgip.org › 2020/03 › monografiya_kkz_4

Коржнев, М.М., & Малахов, І.М. (2012). Техногенні форми рельєфу та оцінка екологічних ризиків і збитків гірничовидобувної діяльності у Криворізькому залізорудному басейні. *Вісник КНУ. Геологія,* 58, 46–50.

Пігулевський, П.Г., Тяпкін, О.К., & Свистун, В.К. (2018). Застосування геофізичних методів для вирішення гідрогеоекологічних завдань на території Південного Кривбасу. *Геофізичний журнал*,40(3),165–178.

Рудько, Г.І., & Яковлєв, Є.О. (2018). Регіональні техногенні зміни еколого-геодинамічних умов розробки залізорудних родовищ Кривбасу. *Мінеральні ресурси України*, 2, 43-50. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2018_2_8

Тяпкін, О.К. (2006). *Геофізичні методи вирішення геоекологічних завдань*. Моноліт.

Шапар, А.Г., Скрипник, О.О., & Міхєєв, О.В. (2018). *Новітня парадигма вилучення природних ресурсів з навколишнього середовища*. ІППЕ НАН України.

References

Anisimova, L., Babyi, K., & Pihulevskyi, P. (2022). Some hydrochemical features of water filtration sources from under the left-bank dumps. XVI International Scientific Conference *"Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. 15–18 November 2022, Kyiv, Ukraine. p. 5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580188

Bagriy, I.D., Blinov, P.V., & Belokopytova, N.A. (2002). Geoecological problems of the Kryvyi Rih basin in the context of restructuring of the mining industry. Phoenix [in Ukrainian].

Bagriy, I.D., Gozhyk, P.F., & Samotkal, E.V. (2005). *Hydroecosystem of the Kryvyi Rih Basin – state and directions of improvement*. Phoenix.

Batur, M., & Babii, K. (2022). Spatial assessment of air pollution due to mining and industrial activities: a case study of Kryvyi Rih Ukraine. III International Conference "*Essays of Mining Science and Practice"* IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 970 (012004). 13. https://doi.org/10.1088/1755-1315/970/1/012004

Dovgiy, S.O., Ivanchenko, V.V., Korzhnev, M.M., Trofymchuk, O.M., & Yakovlev, E.O. (2021). *Research on the ecological state of post-mining areas in Ukraine on the example of the Kryvyi Rih basin and its surroundings*. Nika-Center. https://itgip.org › wp-content › uploads › 2021/12 [in Ukrainian].

Dovhyy, S.O., Korzhnev, M.M., & Trofymchuk, O.M. (2017). *Geological structure and modern geological, economic and environmental conditions of mining and processing of iron ores of the Kryvyi Rih-Kremenchuk zone*. Nika-Center. https://itgip.org › 2020/03 › monografiya_kkz_4. [in Ukrainian]

Grafe, M., Eick, M.J., & Grossel, P.R. (2001). Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goethite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science. Soc. Am. J.*, 65, 1680–1687. https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1680Gintov, O.B. (2004). Fault zones of the Ukrainian Shield. Influence of fault formation processes on the formation of the structure of the earth's crust. *Geophysical Journal*, 26(3), 3–24 [in Ukrainian].

Gubina, V.G., Gorlytskyi, B.O. (2010). *Iron-containing wastes of Ukraine: status and prospects of use.* Logos [in Ukrainian].

International Register of Potentially Toxic Chemicals, Global Environment Monitoring System, Monitoring and Assessment Research Centre Netherlands, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer. (1992). UNEP. https://digitallibrary.un.org/record/161613

Ivanik, O. M., Shevchuk, V. V., & Tustanovska, L.V. (2020). *Estimation of neotectogenesis factors of the Middle Dnieper region by structural-morphometric nethod*. International Conference Geoinformatics 2020, 11–14 May, 2020. https://doi.org/10.17721/1728-2713.99.01

Jackson, B.P., & Miller, W.P. (2000). Effectiveness of phosphate and hydroxide for desorption of arsenic and selenium species from iron oxides. *Soil Sci. Soc. Am. J*., 64, 1616-1622. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451616x

Korzhnev, M.M., & Malakhov, I.M. (2012). Technogenic landforms and assessment of environmental risks and losses of mining activities in the Kryvyi Rih iron ore zone. pool. *Bulletin of the Kyiv National University. Geology*, 58, 46–50 [in Ukrainian].

Menshov, A. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1, 15–22.

Manning, B.A., & Goldberg, S. (1996). Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxide minerals. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 121–131. https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000010020x

Pigulevskiy, P., Svistun, V., Slobodyaniuk, S., & Kyryliuk, A. (2016). *Studying of modern flooding of southwestern part Krivbass by geophysical methods*. Geoinformatics 2016 - XVth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201600477

Pigulevskiy, P.I., & Svystun, V.K. (2021). *Influence of technogenic objects on the development of landslides in the south of Kryvbass*. Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities. 20–23 September 2021, Odessa, Ukraine. P. 5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1018

Pigulevsky, P.G., Tyapkin, O.K., & Svystun, V.K. (2018). Application of geophysical methods to solve hydrogeoecological problems in the territory of Southern Kryvbas. *Geophysical Journal* ,40(3),165–178 [in Ukrainian].

Pihulevskyi, P., Svystun, V., & Tiapkin, O. (2019). Monitoring (2019). Conference - Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment: 12–15 November 2019. Repeated geophysical researches of hazardous geoecological processes near mining waste storage facilities of southern Kryvbas. 262–272. Curran Associates, Inc.

Pihulevskyi, P., Tiapkin, O., & Anisimova, L. (2018). Prediction of the azimuths of dangerous emissions of radioactive wastes stores. Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment:

Proceedings of XII International Scientific Conference. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580063

Pihulevskyi, P.H., Kendzera, O.V., & Babiy K.V. (2023). Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 5–10. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/005

Rudko, G.I., & Yakovlev, E.O. (2018). Regional technogenic changes in ecological and geodynamic conditions of development of iron ore deposits of Kryvbas. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 43–50. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Mru_2018_2_8 [in Ukrainian].

Semenenko, Ye.V., Medvedieva, O.O., & Biliaiev, N.N. (2022). Mathematical model for express evaluation of process of dust air pollution in tailing facility. *Геотехнічна механіка*, 162, 112–125. http://nbuv.gov.ua/UJRN/gtm_2022_162_12

Shapar, A.G., Skrypnyk, O.O., & Mikheev, O.V. (2018). *The latest paradigm of extracting natural resources from the environment*. IPPE NAS of Ukraine [in Ukrainian].

Tiapkin, O.K., Pihulevskyi, P.H., & Dovbnich, M.M. (2017). Taking into account of influence of earth crust faults in solving geological and geoecological tasks by geophysical methods. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 15–22.

Tonkha, O., Menshov, O., Bykova, O., Pikovska, O., & Fedosiy, I. (2020). Magnetic methods application for the physical and chemical properties assessment of Ukraine soil. In XIV International Scientific Conference *"Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 1, 1–5.

Tyapkin, O.K. (2006). *Geophysical methods for solving geoecological problems*. Monolith [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 09.12.24
Прорецензовано / Revised: 30.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Petro PIGULEVSKIY[1], DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ua.fm

Mykhailo DOVBNICH[2], DSc (Geol.), Assos. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-9167-4630
e-mail: dovbnichm@gmail.com

Oleh TIAPKIN[2], DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-2345-8343
e-mail: tiapkin.oleh@gmail.com

Olha MEDVEDIEVA[3], DSc (Techn.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-5575-713X
e-mail: medvedevaolga1702@gmail.com

Larysa ANISIMOVA[3], PhD (Biol.)
ORCID ID: 0000-0003-3398-5400
e-mail: lanisimova@gmail.com

[1]S.I. Subbotin institute of geophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine
[3]M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

CUMULATIVE IMPACT OF THE MINING INDUSTRY AND AGRICULTURE ON THE HYDROGEOCHEMICAL STATE OF THE TERRITORY (BASED ON THE EXAMPLE OF SOUTHERN KRYVBAS)

Background. ***Southern Kryvbas is one of the most industrially loaded territories in southeastern Ukraine. Manmade changes in the environment are becoming irreversible, affecting the ecosystem, especially the soils. The presented studies conducted a general analysis of the mobility of the main chemical elements that pollute the territory adjacent to mining enterprises as a result of agricultural activities and determine the degree of influence of the migration of relevant chemical elements on the geochemical state of soils, surface, and groundwater.***

Methods. ***To determine the degree and nature of manmade changes in the hydrogeochemical state of southern Kryvbas, a comparative-statistical analysis method was applied to generalize the results of previous hydrogeochemical studies of the impact of the mining industry and agriculture on the main components of the environment.***

Results. ***As a result of the joint action of industrial and agricultural activity factors over a long period, new stable natural-manmade geosystems have formed. The main pollutants of soils, groundwater, surface waters, and bottom sediments in mining regions are waste from the mining industry and agricultural fertilizers. The analysis of the main pollutants shows that the contaminating components are practically identical. This leads to an unjustified exaggeration of the results of mining activities in the overall pollution of adjacent agricultural territories. It has been shown that it is insufficient to rely solely on geochemical data to distinguish the hazardous impact of the mining industry and agricultural complex on the pollution of a particular region. Additional spatial-temporal geological-geophysical studies of both the sources and pathways of specific types of pollution are necessary. At the same time, the structural-tectonic features play a decisive role in assessing the hydrogeoecological state of the research territory, for the parameterization of which the use of known concepts about the systems of Precambrian faults established based on a comprehensive set of geological-geophysical data is required.***

Conclusions. ***It has been concluded that the migration of specific chemical elements has a significant impact on the geochemical state of soils, surface, and groundwater. The presence of spatial-depth geological-geophysical information about the features of tectonic (fault-block) structure is one of the foundations for the development of a methodology for distinguishing the elements of the hazardous impact of the mining industry and agricultural complex in the formation of the overall hydrogeochemical state of a specific region.***

Keywords. ***mining industry waste, hydrogeochemistry, fertilizers, mobile forms of chemical elements, geological-geophysical information, tectonic structure, crustal faults, chemical contamination of soils, surface and groundwater.***

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.

UDC 54.027:546.22:549.76:551.44
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.08

Tofik AHMADOV, DSc (Geol. & Mineral.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0634-5600
e-mail: akhmedov.tofik@bk.ru
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Amikishi ASADLİ, Doctoral Student
ORCID ID: 0009-0003-0711-8028
e-mail: amikishiasadli@gmail.com
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

IMPROVING THE VISUALIZATION OF THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE HOVSAN AREA, AZERBAIJAN USING VSP

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

Background. *Increasing the resolution (both vertical and horizontal) of land and borehole seismic exploration is an urgent task facing geophysicists. There are various ways to increase the resolution of seismic studies, among which inelastic absorption takes a special place. This method has not been widely used compared to other methods (for example, distribution of the total charge of explosives over smaller ones, i.e., grouping of sources, inverse filtering - deconvolution, etc.) due to the limited amount of information about inelastic absorption and the difficulty of determining it or the quality factor of the environment. Important information for determining the quality factor of the medium and inelastic absorption is provided by borehole seismic exploration, in particular, VSP (vertical seismic profiling). The recent VSP at well N 1856 of the Govsan area made it possible to determine the inelastic absorption of the medium from well observations and thereby restore the weakened higher frequency components of the seismic wave field, which made it possible to quite significantly change the observed wave pattern on time sections, enriching it with high frequency components and thereby increasing the resolution of surface as well as borehole seismic data. This research aims to improve the vertical resolution of land and borehole seismic exploration using vertical seismic profiling data on inelastic absorption of the geological medium.*

Methods. *Based on the VSP data, the effective quality factor Q parameter was determined. For this purpose, the entire recorded VSP interval was divided into 4 parts.*

Results. *The entire recorded VSP interval was divided into four parts: the full interval (~324–4500 m measured depth) for determining the effective quality factor Q, and three sub-intervals – upper (~324–1887 m), middle (~1803–3799 m), and lower (~3814–4500 m) – for calculating interval values of the quality factor. After determining Q for each interval, the average effective quality factor Q=145 was obtained and applied to restore attenuated frequencies on seismic time sections and the vertical component Z of the VSP profile. A comparison of the original and processed seismic time sections after Q=145 filtering shows significant improvements in resolution. The restoration of high-frequency components in seismic records has notably enhanced the clarity of both surface seismic and VSP time sections. The results confirm that applying VSP-derived quality factor parameters can be highly effective in land seismic data processing.*

Conclusions. *The application of Q-filtering with an effective quality factor of Q=145 has significantly improved the resolution of both surface seismic and VSP time sections. The results demonstrate the effectiveness of utilizing certain VSP parameters in land seismic processing. Additionally, restoring attenuated high-frequency components enhances data clarity and interpretability. The use of the quality factor can be integrated at different processing stages, with its optimal application determined experimentally to achieve the best results.*

Keywords: *Vertical Seismic Profiling (VSP), inelastic absorption, quality factor, surface and borehole seismic exploration, time intervals, seismic time sections.*

Background

The paper is devoted to the studies which covered the Hovsan field in the Absheron oil and gas region of Azerbaijan, as this field is featured by rather complicated seismic and geological conditions, as well as complex reservoir properties, and in recent years it has been one of the intensively developed onshore fields in Azerbaijan. Despite the fact that this field was discovered in 1948 and production here started since 1950, its reserves have not yet been exhausted, especially in the underlying layers of Productive Series. It is known that as study depth increases, the resolution of seismic survey deteriorates and the problem of its improvement becomes urgent (Alizade et al.,1966; Akhmedov et al, 2012).

The Hovsan field is located on a coastal plain covered by ancient Caspian sediments in the southern part of the Absheron Peninsula of Azerbaijan (Fig. 1).

Method

The geological setting of this field has been repeatedly studied by use of various geological and geophysical methods. Over the years, geological survey, exploration drilling and deep drilling, gravity and seismic surveys were carried out in the area. The last 2D CDP seismic surveys were carried out here in 2004. Studies by VSP were held here in 2010, and in 2011–2012 this area was covered by 3D seismic survey (Akhmedov et al, 2012). Located in the northwestern and western parts of the area, the Surakhany field has been under production since 1904, the Karachukhur field since 1928, and the Zykh field since 1935. Later, in 1948, an oil field was discovered in the Qala suite in Hovsan area.

According to seismic data acquired from the lower part of Productive Series, including Qala suite, the Hovsan area is located in the southwestern side of Hovsan syncline and is characterized by a monoclinal occurrence of layers (Fig. 2).

Hovsan oil field belongs to the distant eastern subsidence of the Karachukhur-Zykh uplift. Here, the rocks of Qala suite buried with a sharp angular unconformity on the eroded surface of the Pontian, wedge out upward along the uplift or adjoin the fault planes. Apparently, the presence of an ancient (Miocene age) small protrusion in the areas of Qala suite presence caused a decrease in the thickness of these deposits.

It is assumed that the accumulation of oil in the anticlinal trap is associated with facies replacement. By deep drilling the ancient Caspian deposits, Absheron, Akchagyl, Productive Series and partially the Pontian were recovered and studied. Pontian deposits with a thickness of 10–36 m were recovered in wells No. 1308, 1810, etc. Here these deposits are represented mainly by clays. Available deep drilling and seismic data do not allow to design the correct geological model of oil traps for Qala suite in Hovsan area

© Tofik Ahmadov, Asadli Amikishi, 2025

(Akhmedov et al., 2012). Oil accumulations can presumably be associated with lithofacies changes and low-amplitude faults. For the last years the attention of geoscientists has also been focused on Miocene deposits, represented in the clay facies with sandy interlayers and located in overpressure zone. The diagram of Zykh-Hovsan area coverage by deep drilling is shown in Fig. 3.

The lithological and stratigraphic characteristics of geological section in Zykh-Hovsan area were studied by the data of deep drilling. In this area mainly Neogene deposits of the ancient Caspian Sea, rocks of the Absheron and Akchagyl stages, Productive Series and partially Pontian are developed. Miocene rocks are underlying the Pontian.

According to the "International Tectonic Map of the Caspian Sea and its Framing" edited by V. E. Khain et al., the study area is located within two large structural elements: the Kur (northern part) and the South Caspian (southern part) depressions. In the south of the area, the South Caspian depression is complicated by the Absheron-Gobustan trough (Alizade et al., 1966).

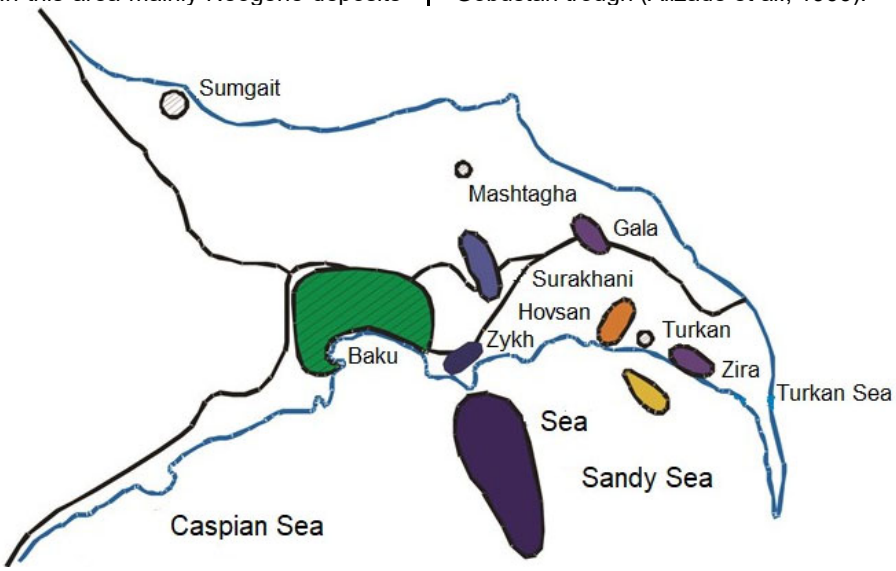


Fig. 1. Layout of the Hovsan structure on Absheron Peninsula

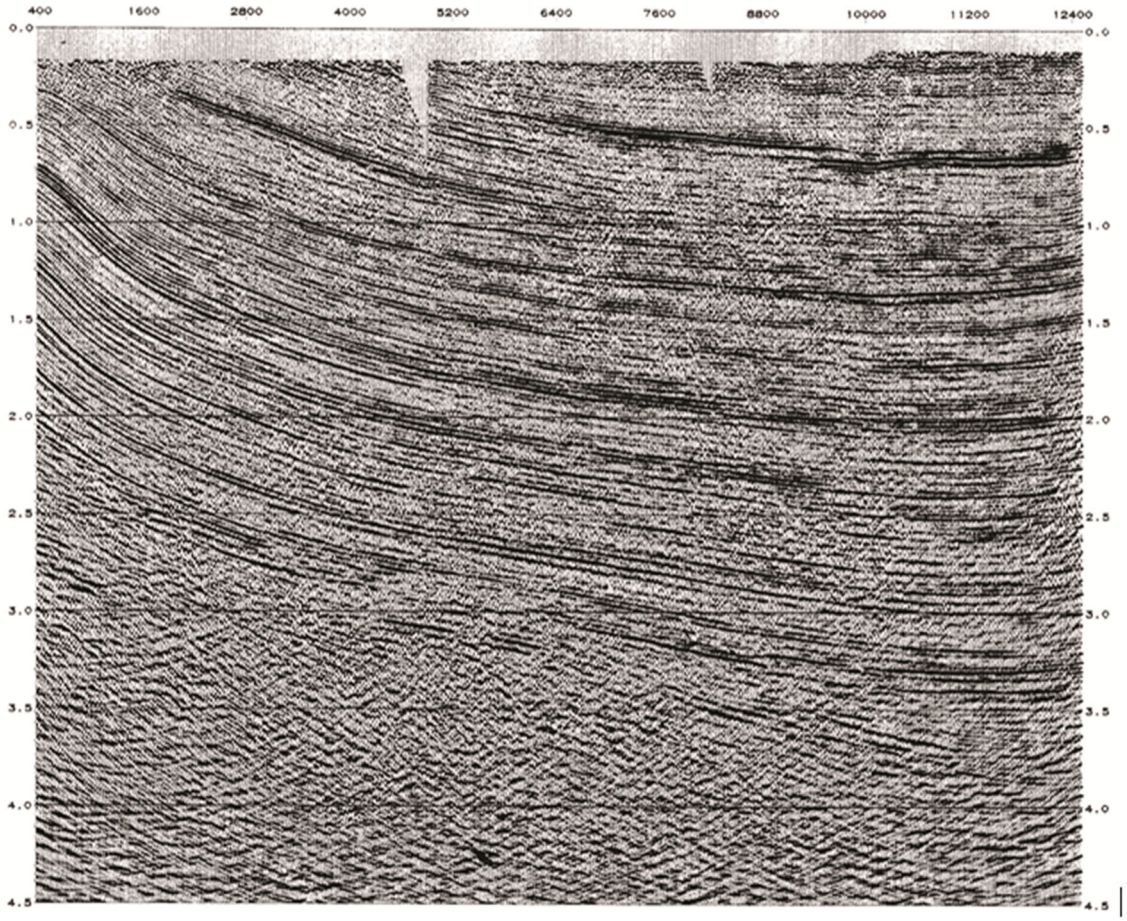


Fig. 2. CDP time section (2D seismic survey of Hovsan area)

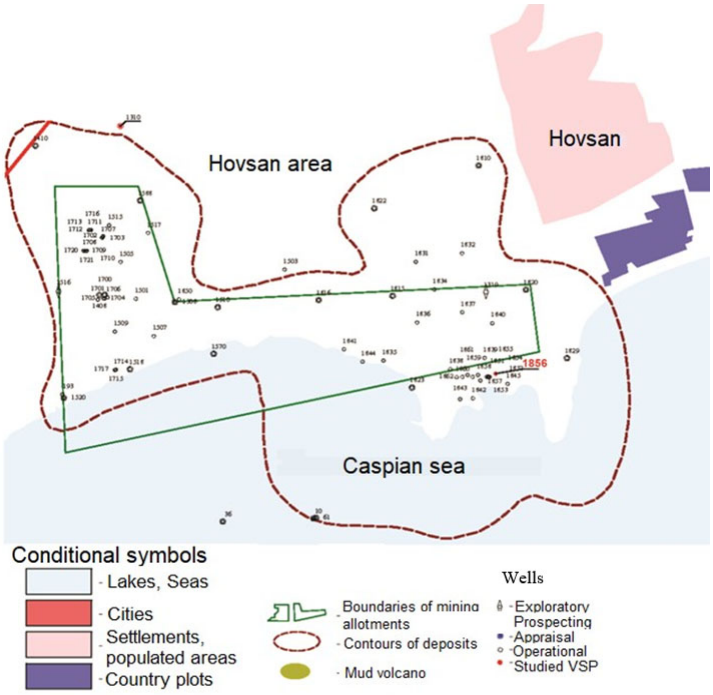


Fig. 3. Scheme of exploration of Hovsan area by deep drilling

Hovsan area constitutes the part of East Absheron synclinorium and embraces Zykh portion of Garachukhur-Zykh anticline, Hovsan area and partially, the Bina-Hovsan syncline.

Garachukhur-Zykh anticline is the extreme, southern, rise on land of the Sarygayabashi-Shah-Deniz anticline zone, to which the largest oil and gas fields of Azerbaijan are attributed.

Results

Determination of inelastic absorption makes it possible to use Q-filtering in order to restore the absorbed high-frequency components of the seismic record and increase the visual resolution of both surface seismic data and VSP (Boganik, & Gurvich, 2006; Galperin, 1982; Galperin, 1994; Andersen, Bartling, & Nelson Jr., 2014; Lensky et al., 2014; Lensky et al., 2020). In the best way, the quality factor is determined from the VSP vertical profile data and then used in the processing of land seismic survey data (Tabakov et al., 2006; Shekhtman, & Bayuk, 2015; Sherif, & Geldart, 1987; Bourbié, 2006; Shneerson, & Zhukov, 2013/2014; Bakulin, 2003). The determination of the quality factor is based on the analysis of measured amplitudes of incident P-wave at different levels, between which the quality factor parameter is determined. Fig. 4 demonstrates changes of amplitudes of seismic longitudinal waves with depth (or with time) and depth intervals, for which the quality factor is evaluated. It should be noted that the ratio of recorded (observed) amplitudes is a complex function of large number of conditions, ranging from field, or more precisely downhole, to the type of equipment and applied processing algorithms. Therefore, the numerical value of determined quality factor Q is a mathematical parameter rather than a physical one, which could be measured in “laboratory conditions”. That is why the values of quality factor Q determined for the same horizons within the same field can differ significantly (Hardage et al., 2011; Maultzsch et al., 2009). However, their importance consists in the fact that by applying these mathematical parameters to compensate for inelastic absorption, the obtained results are correct and adequate from the point of view of increasing the apparent resolution of seismic sections.

The field of incident P-waves was extracted from the vertical component of the VSP longitudinal profile using a 15x1 filter. Then, the entire recorded VSP interval was divided into 4 parts: the full interval ~324–4500 m of measured depth – to determine the effective quality factor Q and 3 components (parts) of the full interval: the upper (~324–1887 m of measured depth), middle (~1803–3799 m of measured depth) and lower (3814–4500 m of measured depth) to determine the interval values of quality factor (Fig. 5). The depths of component intervals were selected based on the number of columns (one or two) to maintain identical conditions for recording of seismic amplitudes. To determine the quality factor Q, two of the most stable and commonly used inversion algorithms were used: spectral ratio and iterative-spectral methods (multiple spectral ratio). The following values of quality factor Q were obtained: ~142–155 for the entire VSP interval, ~75–85 for the middle interval and ~33–38 for the lower interval. The inversion for the upper interval was unstable and adequate results could not be achieved. The most likely reason for this is the fact of recording in a double column and the complication by pipe waves affecting the amplitudes of the first arrivals, which is critical in this case. In general, the inversion was stable. In addition, determination of the quality factor from the non-longitudinal VSP (NVSP) profile by spectral and iterative spectral methods revealed very similar values. And although, according to the theory, NVSP cannot be used to determine the quality factor, this still adds confidence in the adequacy of certain values.

An average effective quality factor Q=145 was used to reconstruct the attenuated frequencies in the seismic time sections and the vertical component Z of VSP profile.

The original time section of land seismic survey is shown in Fig. 6a and its change after filtering with a quality factor Q_P=145 in Fig. 6b. It will be interesting to trace changes in the VSP time section while taking into consideration the inelastic absorption of the medium.

Fig. 7 shows the results of applying filtering with a quality factor Q_P=145 to VSP data.

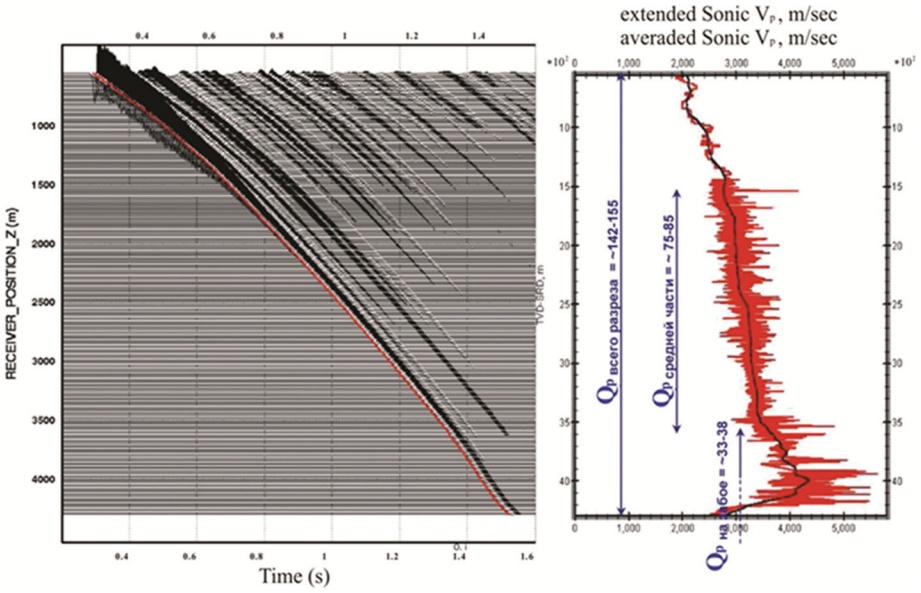


Fig. 4. Determination of the quality factor Q_P of the incident longitudinal wave according to VSP data: Q_P of the entire section varies as 142–145, Q_P of the middle part of the section =75–85 and Q_P of the lower part of the section =33–38

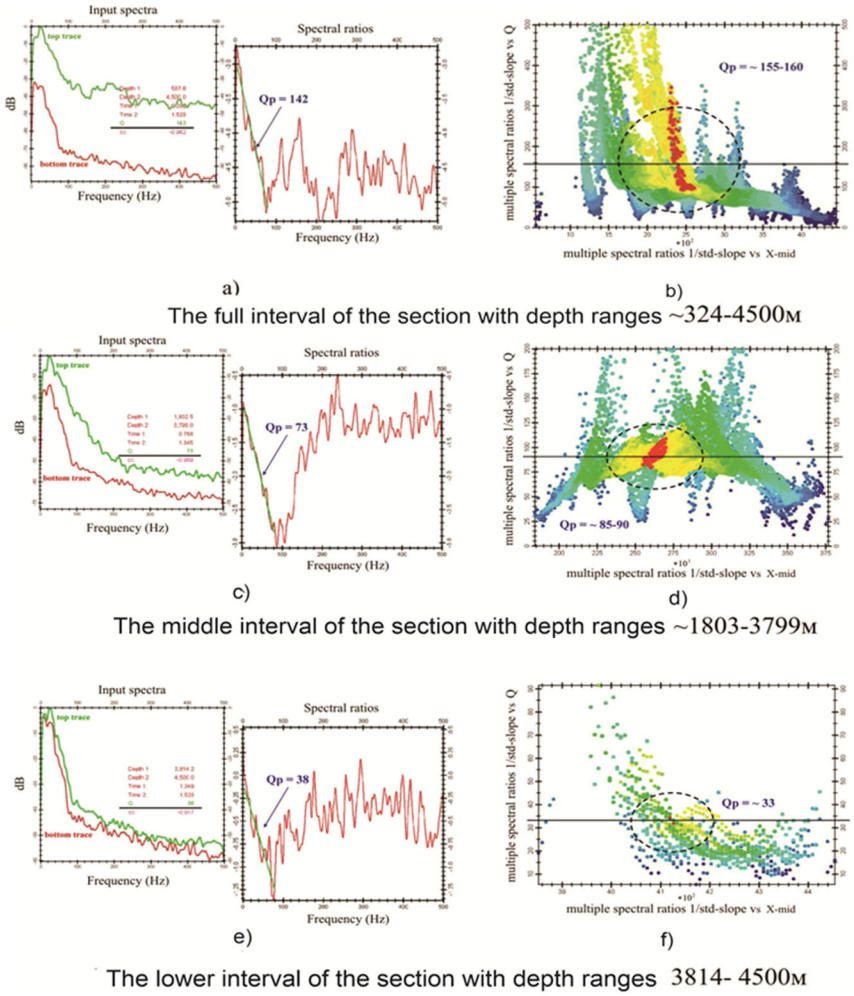


Fig. 5. Determination of inelastic absorption of the medium by spectral (a, c, e) and iterative spectral (b, d, f) methods for the full (a, b), middle (c, d) and lower (e, f) section intervals

ISSN 1728-3817

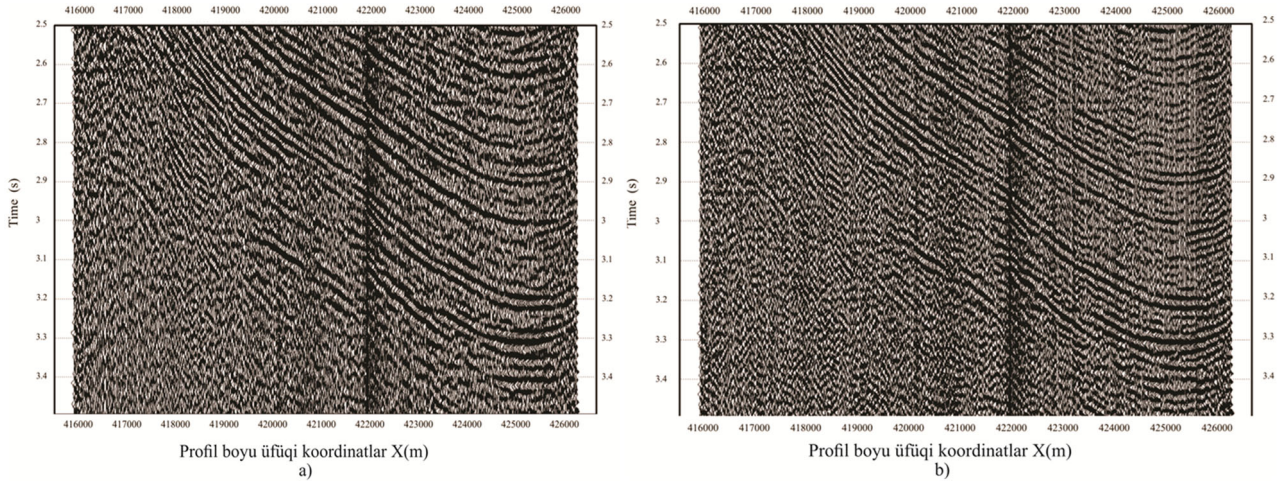


Fig. 6. Time sections of land seismic survey:
a – original, b – after applying filtering with quality factor Q_P=145

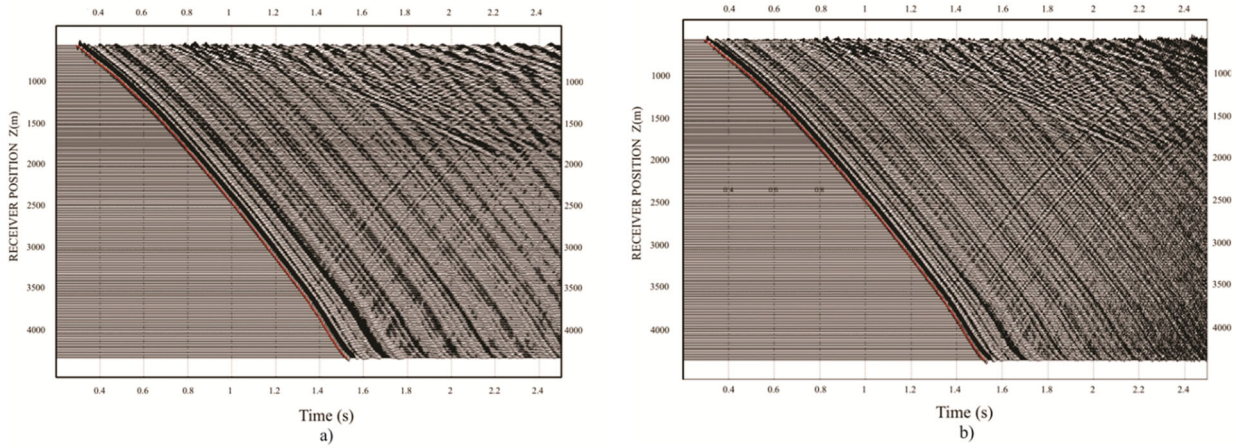


Fig. 7. VSP time sections:
a–original, b–after applying filtering with quality factor Q_P=145

Restoring of relatively weak components of seismic records significantly increases the resolution of VSP (Fig. 7, b).

Discussion and conclusions

The results of Qp filtering display significant improvement of seismic survey resolution, which clearly demonstrates the effective possibilities of use of some VSP parameters in processing of surface and borehole seismic data. Also, it should be noted that the use of quality factor can be carried out at different stages, which is often determined by the experiment to achieve the best results.

It can be seen, that the inelastic absorption parameter (quality factor Qp) was calculated for various VSP intervals. Qp filtering using the calculated values showed a significant increase in the resolution of seismic records of both land seismic time sections and VSP data.

References

Akhmedov, T. R. et al. (2012). Some results of ground and borehole seismic exploration of the Govsaninsky hydrocarbon deposit. *Karotazhnik. Scientific and technical bulletin*, 6(216) [in Russian]. [Ахмедов, Т. Р. и др. (2012). Некоторые результаты наземных и скважинных сейсморазведок на месторождении Говсанского углеводорода. *Каротажник. Научно-технический бюллетень*, 6(216)].

Alizade, A. A. et al. (1966). *Geology of oil and gas fields of Azerbaijan*. Nedra [in Russian]. [Ализаде, А. А., и др. (1966). *Геология нефтяных и газовых месторождений Азербайджана*. Недра].

Andersen, Bartling, & Nelson Jr. (2014). Downhole seismic identifies reservoirs at the production point. *Journal of Oil and Gas*, 50–57.

Boganik, G. N., & Gurvich, I. I. (2006). *Seismic exploration*. AIS [in Russian]. [Боганик, Г. Н., & Гурвич, И. И. (2006). *Сейсморазведка*. АИС].

Bourbié, T. (2006). L'atténuation intrinsèque des ondes sismiques. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* [in French].

Galperin, E. I. (1982). *Vertical seismic profiling*. Nedra [in Russian]. [Галперин, Е. И. (1982). *Вертикальное сейсмическое профилирование*. Недра].

Galperin, E. I. (1994). *Vertical seismic profiling: experience and results*. Science [in Russian]. [Galperin, E. I. (1994). *Вертикальное сейсмическое профилирование: опыт и результаты*. Наука].

Hardage, B. A., De Angelo, M., Murray, P. E., & Sava, D. (2011). *Multi-component seismic technology*. Society of Exploration Geophysicists.

Lensky, V. A., Adiev, A. Ya., Irkabaev, D. R., & Sharova, T. N. (2014). Borehole seismic exploration. Goals, tasks to be solved and geological efficiency. *Seismic exploration technologies*, *2*, 117–124 [in Russian]. [Ленский, В. А., Адиев, А. Я., Иркабаев, Д. Р., & Шарова, Т. Н. (2014). Сейсморазведка скважин. Цели, решаемые задачи и геологическая эффективность. *Сейсморазведочные технологии*, *2*, 117–124].

Lensky, V. A., Zhuzhel, A. S., Chanyshev, Sh. R., & Salikhova, F. Kh. (2020). Comparison of inelastic absorption estimates from land seismic and vertical seismic profiling data, 12(348), 33–39 [in Russian]. [Ленский, В. А., Жужель, А. С., Чанышев, Ш. Р., & Салихова, Ф. Х. (2020). Сопоставление оценок неупругого поглощения по данным наземной сейсмики и вертикального сейсмического профилирования, 12(348), 33–39].

Maultzsch, S., Nawab, R., Yuh, S. et al. (2009). An integrated multi-azimuth VSP study for fracture characterization in the vicinity of a well. *Geophysical Prospecting*, 57, 263–274.

Shekhtman, G. A., & Bayuk, I. O. (2015). Models of real environments in vertical seismic profiling technologies. *Seismic exploration technologies*, 2, 59–68 [in Russian]. [Шехтман, Г. А., & Баюк, И. О. (2015). Модели реальных сред в технологиях вертикального сейсмического профилирования. *Сейсмические технологии*, 2, 59–68].

Sherif, R., & Geldart, L. (1987). *Seismic exploration* (Vol. 1). Mir [in Russian]. [Шериф, Р., & Гелдарт, Л. (1987). *Сейсмическая разведка* (Т. 1). Мир].

Shneerson, M. B., & Zhukov, A. P. (2013/2014). Vertical seismic profiling (VSP) on geophysical conventions. *English Geophysics*.

Tabakov, A. A., Baranov, K. V., Rykovskaya, N. V., & Kopchikov, A. V. (2006). Methodology and some results of processing MOG and 3D VSP data. *Seismic exploration technologies*, 2, 8–13 [in Russian]. [Табаков, А. А., Баранов, К. В., Рыковская, Н. В., & Копчиков, А. В. (2006). Методология и некоторые результаты обработки данных МОГ и 3D ВСП. *Сейсмические технологии разведки*, 2, 8–13].

Vyzhva, S., Lisny, G., & Kruhlyk, V. (2016). Use of graphic processors for construction of the geological media seismic images. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(75), 45–49 [in Ukrainian]. [Вижва, С., Лісний, Г., & Круглик, В. (2016). Застосування графічних процесорів для побудови сейсмічних зображень геологічного середовища. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 4, 45–49.].

Vyzhva, S., Solovyov, I., Kruhlyk, V., & Lisny, G. (2018). Prediction of high porosity zones in clay rocks at the Eastern Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *1*(80), 33–39 [in Ukrainian]. [Вижва, С., Соловйов, І., Круглик, В., & Лісний, Г. (2018). Прогнозування зон підвищеної пористості у глинистих породах Сходу України. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 1(80), 33–39].

Отримано редакцією журналу / Received: 27.12.24
Прорецензовано / Revised: 03.02.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Тофік АХМАДОВ, д-р наук (геологія та мінералогія), проф.
ORCID ID: 0000-0003-0634-5600
e-mail: akhmedov.tofik@bk.ru
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан

Амікиші АСАДЛІ, докторант
ORCID ID: 0009-0003-0711-8028
e-mail: amikishiasadli@gmail.com
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан

ПОЛІПШЕННЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГЕОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ РАЙОНУ ГОВСАН, АЗЕРБАЙДЖАН, ЗА ДОПОМОГОЮ VSP

В с т у п . ***Підвищення роздільної здатності (як вертикальної, так і горизонтальної) наземної та свердловинної сейсмічної розвідки є актуальним завданням, що стоїть перед геофізиками. Існують різні методи підвищення роздільної здатності сейсмічних досліджень, серед яких особливе місце посідає врахування неластичного поглинання. Цей метод не отримав широкого розповсюдження порівняно з іншими методами (наприклад, розподіл загального заряду вибухових речовин на менші, тобто групування джерел, зворотна фільтрація – деконволюція тощо) через обмежену кількість інформації про неластичне поглинання та складність його визначення або оцінки фактора якості середовища. Важливу інформацію для визначення фактора якості середовища та неластичного поглинання надає свердловинна сейсморозвідки, зокрема вертикальне сейсмічне профілювання (VSP). Нещодавнє проведення VSP у свердловині № 1856 району Говсан дало змогу визначити неластичне поглинання середовища за результатами свердловинних спостережень і, таким чином, відновити ослаблені високочастотні компоненти сейсмічного хвильового поля. Це значно поліпшило спостережувану хвильову картину на часових розрізах, збагативши їх високочастотними компонентами та, відповідно, підвищивши роздільну здатність як наземних, так і свердловинних сейсмічних даних. Метою цього дослідження є поліпшення вертикальної роздільної здатності наземної та свердловинної сейсморозвідки за допомогою даних вертикального сейсмічного профілювання щодо неластичного поглинання геологічного середовища.***

М е т о д и . ***На основі даних VSP визначено параметр ефективного фактора якості Q. Для цього весь зареєстрований інтервал VSP поділено на чотири частини.***

Р е з у л ь т а т и . ***Весь зареєстрований інтервал VSP поділено на чотири частини: повний інтервал (~324–4500 м глибини) для визначення ефективного фактора якості Q та три підінтервали – верхній (~324–1887 м), середній (~1803–3799 м) і нижній (~3814–4500 м) – для розрахунку інтервальних значень фактора якості. Після визначення Q для кожного інтервалу отримано середнє значення ефективного фактора якості Q=145, яке було застосовано для відновлення ослаблених частот на часових сейсмічних розрізах та вертикальної компоненти Z профілю VSP. Порівняння вихідних та оброблених часових сейсмічних розрізів після застосування Q-фільтрації з Q=145 демонструє суттєве поліпшення роздільної здатності. Відновлення високочастотних компонент у сейсмічних записах значно поліпшило чіткість як наземних сейсмічних, так і VSP-часових розрізів. Результати підтверджують ефективність використання параметрів фактора якості, отриманих із VSP, у процесі обробки наземних сейсмічних даних.***

В и с н о в к и . ***Застосування Q-фільтрації з ефективним фактором якості Q=145 значно поліпшило роздільну здатність як наземних, так і VSP-часових розрізів. Отримані результати демонструють ефективність використання певних параметрів VSP у процесі обробки наземних сейсмічних досліджень. Крім того, відновлення ослаблених високочастотних компонент підвищує чіткість та інтерпретованість даних. Використання фактора якості може бути інтегроване на різних етапах обробки, а оптимальні умови його застосування визначаються експериментально для досягнення найкращих результатів.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***вертикальне сейсмічне профілювання (VSP), неластичне поглинання, фактор якості, наземна та свердловинна сейсморозвідка, часові інтервали, часові сейсмічні розрізи.***

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.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 548/549.7
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.09

Ірина КВАСНИЦЯ, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-0738-4599
e-mail: irynakvasnytsia@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

МОРФОЛОГІЯ СИДЕРИТУ З ГЕОЛОГІЧНИХ УТВОРЕНЬ УКРАЇНИ

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

Вступ. *Карбонати – досить поширені мінерали в Україні, серед них найважливішими і найпоширенішими є кальцит, сидерит, родохрозит, доломіт і давсоніт. Сидерит представлений в основному трьома різновидами: власне сидеритом, Mg-сидеритом (сидероплезит) і Mn-сидеритом (манганосидерит, олігоніт). Незважаючи на те, що знахідок сидериту в геологічних утвореннях України чимало, інформація про особливості морфології мінералу досить обмежена. Дана робота систематизує й аналізує існуючі на сьогодні відомості щодо морфології сидериту в геологічних утвореннях України. Наведено результати дослідження нових знахідок Mn-сидериту (олігоніту), які нещодавно знайдено в численних проявах тріщинної вторинної мінералізації Рафалівського родовища базальтів у межах Волино-Подільської трапової формації нижнього венду Східноєвропейської платформи.*

Методи. *Для дослідження кристалів Mn-сидериту з базальтів Волині використано гоніометричні (двокружний гоніометр ГД-1), електронно-мікроскопічні (електронний мікроскоп JSM-6700F (JEOL, Японія), обладнаний енергодисперсійною системою для рентгеноспектрального мікроаналізу JED-2300 (JEOL, Японія)), рентгенометричні (дифрактометр ДРОН-2(3М)) методи дослідження.*

Результати. *Сидериту з геологічних утворень України притаманне значне морфологічне розмаїття: це окремі тонкодисперсні частинки і пластинчасті, обкатані, часто ідіоморфні зерна різної розмірності, а також тонкозернисті прошарки, жили, лінзи різної потужності, гнізда, друзові утворення, конкреції (сферолітової і оолітової будови, жовна), які майже повністю складені сидеритом або він входить до їх складу як переважна компонента, виділення неправильної форми; часто мінерал виступає як цемент або входить до його складу. Добре утворені кристали є рідкістю. Перелік простих форм габітусного значення на кристалах сидериту невеликий: ромбоедри, пінакоїди, в деяких випадках – скаленоедри і призми. Частина кристалів вирізняється своєрідним мікрорельєфом граней, це, зокрема, черепитчасті, черепитчасто-конусні структури, скульптури росту у вигляді сходинок та такі, що нагадують риб'ячу луску; каверни як форми розчинення.*

Висновки. *Дослідження морфології сидериту з різних мінералого-петрографічних комплексів України дають змогу краще зрозуміти умови генезису мінералу та особливості процесів, що сприяли його кристалізації. Вивчення рельєфу на гранях кристалів сидериту допомагає виявити механізми росту та надає цінну інформацію щодо еволюції кристалів, зокрема про їх зміни під впливом зовнішніх факторів.*

Ключові слова: *карбонати, сидерит, олігоніт, морфологія, Рафалівська площа, геологічні утворення України.*

Вступ

Загалом мінерали класу карбонатів є досить поширеними мінералами в Україні, серед них найважливішими і найпоширенішими є кальцит, сидерит, родохрозит, доломіт і давсоніт (Лазаренко та ін., 1960; Лазаренко, Габінет, & Сливко, 1962; Лазаренко та ін., 1963; Лазаренко, & Сребродольський, 1969; Лазаренко, Панов, & Павлишин, 1975; Лазаренко та ін., 1980; Щербак и др.,1990; Матковський, 2003; Цільмак та ін., 2008; Матковський, Павлишин, & Сливко, 2009; Матковський, 2013). Зокрема, сидерит представлений переважно трьома різновидами: власне сидеритом, Mg-сидеритом (сидероплезит) і Mn-сидеритом (манганосидерит, олігоніт).

Найбільші прояви сидериту зафіксовано на Українському щиті (Криворізький басейн, докембрійські утворення Приазов'я, кора вивітрювання утворень Коростенського плутону, Донецька мінералогічна провінція), у Карпатській (Мармароський масив, Вигорлат-Гутинське пасмо, метасоматичні утворення Закарпаття, осадові породи Передкарпаття) і Кримській мінералогічній провінціях (Щербак и др.,1990; Матковський, Павлишин, & Сливко, 2009).

Mg-сидерит (сидероплезит) є одним з головних породотвірних мінералів у неокиснених рудах Білозірського залізорудного району (Щербак и др.,1990). Діагностовано його у сидеритових, магнетит-силікатно-сидеритових і залізистих роговиках Криворізького басейну, у гідротермальних утвореннях Нагольного кряжу і Микитівського рудного поля. Мінерал входить до складу карбонатних конкрецій у вугленосних відкладах Донбасу, тавричної формації Криму, вугленосної товщі Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну, майкопських глин Керченського півострова.

Мінералізація Mn-сидериту (олігоніту) характерна для Карпат і Криму (Щербак и др.,1990; Матковський, 2003). Так, Mn-сидерит є важливою складовою карбонатних стяжінь у відкладах крейдового і палеогенового флішу Українських Карпат. У Криму він є поширеним мінералом кіммерійських карбонатних руд Керченського залізорудного басейну, як головна складова частина тютюнових руд, а також трапляється серед юрських, крейдових і переважно майкопських відкладів Криму, характерний для манганорудних утворень Барокальської улоговини Східного Гірського Криму. Його також встановлено в Північному Причорномор'ї (ув глинистій товщі олігоцену), у складі кіммерійських залізних руд Приазовського району та у родохрозитовій гальці з алювію річок Прут і Дністер (Щербак и др.,1990). У базальтах Волині наша знахідка кристалів Mn-сидериту (олігоніту) зафіксована, мабуть, вперше.

І хоч знахідок сидериту в геологічних утвореннях України чимало, проте інформація щодо особливостей морфології мінералу досить обмежена. Як відомо, інформація щодо морфології того чи іншого мінералу відіграє важливу роль у геології, дозволяючи визначити й уточнити умови мінералоутворення та їх зміни, допомагає зробити важливі висновки щодо історії геологічного середовища. Знання морфології має визначальне значення і при створенні геологічних моделей, які допомагають візуалізувати процеси, що відбуваються під час мінералоутворення; дає змогу оцінити якість корисних копалин, що сприяє оптимізації видобувних процесів та зменшенню витрат.

© Квасниця Ірина, 2025

Метою даної роботи є систематизація і аналіз існуючих на сьогодні відомостей щодо морфології сидериту в геологічних утвореннях України, а також наведення результатів дослідження нових знахідок сидериту, зокрема у накладеній гідротермальній мінералізації вивержених комплексів Волині.

Методи

Для дослідження кристалів Mn-сидериту з базальтів Волині зстосовано гоніометричні (двокружний гоніометр ГД-1), електронно-мікроскопічні (електронний мікроскоп JSM-6700F (JEOL, Японія), обладнаний енергодисперсійною системою для рентгеноспектрального мікроаналізу JED-2300 (JEOL, Японія)), рентгенометричні (дифрактометр ДРОН-2(3М)) методи. Дослідження проведено в лабораторіях Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України.

Як відомо, сидерит входить до групи кальциту і кристалізується у дитригонально-скаленоедричному виді симетрії тригональної сингонії. Переважно мінерал трапляється у вигляді від грубо- до дрібнозернистих, сфероподібних (часто з грубоволокнистою структурою) і мармуроподібних мас; рідше утворює кристали призматичного і скаленоедричного габітусу. Згідно з (Dana, 1922) на кристалах сидериту встановлено такі прості форми: {0001}, {10$\bar{1}$0}, {11$\bar{2}$0}, {10$\bar{1}$0}, {01$\bar{1}$2}, {02$\bar{2}$1}, {05$\bar{5}$1}, {32$\bar{5}$1}, {21$\bar{3}$1}, {24$\bar{6}$1}. Найчастіше кристали ромбоедричні з {10$\bar{1}$1}, рідше {01$\bar{1}$2}, а також з крупними гранями {02$\bar{2}$1} чи {40$\bar{4}$1} та іншими додатковими формами. Грані кристалів нерідко викривлені чи мають складну поверхню. Сидерит інколи утворює двійники по {01$\bar{1}$2}, рідше по {0001}.

Нижче у таблицях зібрано літературні і наші дані морфологічних досліджень сидериту з різних геологічних утворень України. Загалом морфологія сидериту в геологічних утвореннях України досить розмаїта (табл. 1). Найчастіше мінерал формує дрібно- і середньозернисті маси, притаманні йому також сферолітоподібні та інші конкреційні утворення. Зерна сидериту зазвичай бурого кольору, кристали медово-жовті (Щербак и др.,1990). Часто сидерит може утворювати мономінеральні прошарки і лінзи різної потужності, в осадових утвореннях – виступати як цемент; зрідка він утворює добре сформовані кристали (табл. 2).

Таблиця 1

Особливості морфології сидериту з геологічних утворень України*

Місцезнаходження	Геологічні утворення	Особливості морфології сидериту
Криворіжжя	Сидеритові роговики, (кварц-сидеритові прошарки)	Тонкозернисті прошарки, ізометричні зерна розміром 0,00n–0,1 мм
	Сидеритові роговики, (кварц-хлоритові прошарки)	Ідіоморфні зерна у вигляді порфіробластів
	Породи тальк-карбонатного горизонту	Конкреції сферолітової будови розміром 0,8–4,5 мм
	Хлорит-сидерит-кварцові прошарки	Оолітоподібні виділення видовженої, еліпсоїдальної форми розміром 0,1–0,7 мм
	Залізисті роговики	Окремі мономінеральні прошарки, січні і пошарові жили та прошарки, лінзи, ізометричні виділення, сфероліти, окремі добре сформовані кристали
	Багаті залізні руди	Сферолітовий (конкреції діаметром 0,3–1,2 мм) і пойкілітовий (крупні зерна 0,2–20 мм) морфологічний тип
	Бурі залізняки	Жовнові стяжіння
Приазов'я	Кора вивітрювання гранітів	Ромбоедричні зерна розміром 0,25 мм, променисті агрегати
	Сурозьке золоторудне родовище	Прожилки потужністю від 0,05–0,10 до 5–7 мм, інколи гнізда, ниркоподібні натічні виділення
	Палеогенові відклади (пісковики)	Цемент, сферолітові стяжіння розміром до 3,0 мм
Західна Волинь	Кора вивітрювання вивержених порід	Прожилки з роздувами, товщина прожилків від 2–5 мм до 2–3 см. Жовноподібні виділення розміром 10х6 см і більше за товщини до 3–4 см
	Кора вивітрювання діоритів і габро-діабазів	Жовна неправильної форми розміром до декількох см
	Камерні пегматити	Добре сформовані кристали діаметром від 1–2 до 1,5–2,0 см. Кулясті або овальні стяжіння діаметром до 7 мм на гранях або поверхнях спайності польового шпату. Друзові агрегати
Донецький басейн	Ртутні родовища	Прожилки потужністю до 1 см, великі конкреції, пластинчасті кристали розміром 1–2 мм, що вкривають стінки порожнин
	Зони куполоподібної складчастості	Прожилки, гнізда і зернисті виділення у цементі. Сферолітові виділення діаметром 0,1–0,4 мм
	Кварц-карбонат-поліметалічні жили Бобриківського родовища	Вкрапленики розміром до 10 мкм, виділеннями неправильної форми розміром до 80 мкм та порфіробластами амебоподібної форми з пойкілітовою структурою розміром до 150 мкм. Тичкуваті агрегати в жилах, друзові агрегати в тріщинах відриву
Поділля	Гранато-гіперстенові гнейси околиць Завалля	Лінзоподібні скупчення завдовжки від 0,5 до 2,5 мм, складені полігональними ізометричними зернами розміром 0,05-0,2 мм
	Фосфорити миньковецького горизонту доордовицьких відкладів	Викривлені ромбоедричні кристали розміром до 1 мм
	Нижньодевонські породи	Поодинокі зерна
Львівсько-Волинський вугільний басейн	Аргіліти вугленосної товщі	Дрібні видовжені таблички і тонкодисперсні частинки розміром 0,002х0,06 мм. Прошарки завтовшки від 1–2 до 15 мм. Сфероліти розміром від 0,10 до 2,0 мм, в розрізі – пелюсткоподібні видовжені таблички розташовані віялоподібно довкола одного центру. Конкреції еліпсоїдної, кулястої короваєподібної форми розміром від 1–3 до 5–20 см

ISSN 1728-3817

Закінчення табл. 1

Місцезнаходження	Геологічні утворення	Особливості морфології сидериту
Карпатський регіон	Відклади крейдового і палеогенового флішу Карпат	Щільні тонко- і дрібнозернисті агрегати. Розмір зерен від <0,01 до 2–3 мм
	Пісковики і алевроліти	Ромбоподібні, пластинчасті і напівобкатані зерна розміром до 0,1 мм, ізометричні зерна від <0,01 до 2–3 мм у цементі
	Змінені вулканіти Вигорлат-Гутинського пасма, сидеритові руди	Жили, гнізда, лінзоподібні тіла, складені тонкими і дрібними зернами розміром 0,08 мм. Рідше крупнозернисті виділення у вигляді плямистих скупчень, часто сферолітової будови і виповнень у тріщинах
	Поліметалічне, ртутне і арсен-стибієве зруденіння (Берегівський, Вишківський, Оленьовський та інші рудні райони)	Добре сформовані кристали розміром до 2–6 мм. Псевдоморфози по темноколірних мінералах. Виділено два морфологічні типи кристалів
	Осадові утворення Передкарпаття	Входить до складу цементу. Короваєподібні тіла завдовжки 3–4 м і завтовшки 7–9 см
Керченський залізорудний басейн	Руди карбонатного типу	Виділення неправильної, короваєподібної форми
	Тютюнові, частково коричневі руди	Карбонатні конкреції вигадливої, найчастіше приплюснутої форми розміром 25–30 см, у складі яких є сидерит і Mn-сидерит
	Майкопські відклади, крейдові та юрські відклади	Конкреційні стяжіння або жовна щільної афанітової будови, круглої або приплюснуто-круглої форми розміром 45х25 см

****Примітка:*** Укладено з врахуванням даних (Лазаренко та ін., 1960; Лазаренко, Габінет, & Сливко, 1962; Лазаренко та ін., 1963; Лазаренко, & Сребродольський, 1969; Лазаренко, Панов, & Павлишин, 1975; Лазаренко та ін., 1980; Щербак и др.,1990; Матковський, 2003; Цільмак та ін., 2008; Матковський, Павлишин, & Сливко, 2009; Матковський, 2013).

Таблиця 2

Кристаломорфологія та особливості мікрорельєфу граней сидериту з геологічних утворень України*

Місце-знаходження	Геологічні утворення	Обрис і габітус кристалів	Розміри, мм	Мікрорельєф граней
Криворіжжя	Корінні утворення	Кристали призматично-ромбоедричного, пінакоїдального, ромбоедричного і скаленоедричного габітусів	від 0,5–1,0 до 3,0–4,0	Грані призми {11$\bar{2}$0} і скаленоедра {21$\bar{3}$1} – черепитчастий візерунок; грані пінакоїда – матова поверхня; грані скаленоедра – черепитчасто-конусна структура
	Зона гіпергенезу	Ромбоедричні, ромбоедрично-призматичні, скаленоедричні, призматично-скаленоедричні кристали	від частки мм до 4–5	-
Волинь	Камерні пегматити	Ізометричні і приплюснуті кристали. Провідна роль основного ромбоедра {10$\bar{1}$1} у поєднанні з іншими слабкорозвиненими формами	–	Розмаїття скульптур росту і розчинення на гранях основного ромбоедра {10$\bar{1}$1}
	Базальти трапової формації	Ромбоедричні кристали, в огрануванні яких головну роль відіграє основний ромбоедр {10$\bar{1}$1}	до 0,5–0,8 мм	Скульптури росту у вигляді тонких сходинок різної висоти; рельєфні сходинки поліцентричного росту, сліди розчинення у вигляді каверн неправильної форми
Поділля	Фосфорити миньковецького горизонту доордовицьких відкладів	Викривлені ромбоедричні кристали	до 1 мм	Скульптура на гранях, що нагадує риб'ячу луску
Карпатський регіон	Місця розвитку поліметалічного, ртутного і арсен-стибієвого зруденіння	Товстотабличасті і таблитчасті кристали з габітусними гранями пінакоїда і ромбоедрів {05$\bar{5}$1}. Кристали ромбоедричного габітусу {10$\bar{1}$1}. На деяких кристалах є грані скаленоедра {32$\bar{5}$1} і призми {11$\bar{2}$0}	до 2–6 мм	–

****Примітка***: Укладено з врахуванням даних автора та (Лазаренко, & Сребродольський, 1969; Матковський, 2003; Матковський, Павлишин, & Сливко, 2009).

Прояви Mn-сидериту (олігоніту) нещодавно знайдено в численних проявах тріщинної вторинної мінералізації відпрацьованої східної частини Рафалівського родовища базальтів (Західна Волинь) у межах Волино-Подільської трапової формації нижнього венду Східно-європейської платформи. Рафалівська площа розташована на західному схилі Українського щита, на її території волинська серія венду розкрита Рафалівським і Полицьким кар'єрами. Вулканіти даної серії зазнали численних вторинних змін, у т. ч. і карбонатизації, проте проведені раніше дослідження згадують серед карбонатів лише кальцит, анкерит, доломіт, арагоніт, малахіт і азурит (Лазаренко та ін., 1960; Деревська та ін., 2001; Мельничук, 2004; Квасниця та ін., 2009).

Олігоніт тут утворює добре сформовані ізометричні ромбоедричні і приплюснуті псевдокубічні кристали, розміром до 0,5–0,8 мм і тонкі плівки. Дрібні золотисто-коричнюваті кристали формують щітки на стінках порожнин, часто наростаючи на кристали кальциту списоподібного обрису або вкриваючи останній тонкими плівками ~0,5 мм, надаючи кальциту золотистого чи коричневого відтінку (рис. 1). Ступінь прозорості кристалів олігоніту – від напівпрозорих до просвічуючих по краях. На поверхні більшості кристалів олігоніту спостерігається дуже тонка плівка недіагностованих вторинних мінералів індигово-фіолетового кольору.

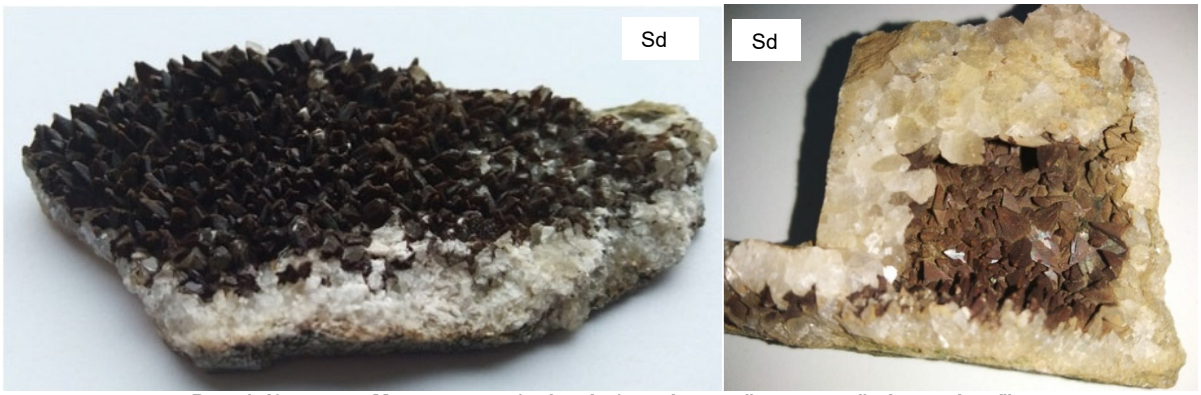


Рис. 1. Кристали Mn-сидериту (олігоніту) з тріщинної вторинної мінералізації (Рафалівське родовище базальтів, Західна Волинь)

Кристаломорфологія Mn-сидериту досить проста – це здебільшого ромбоедри, в огранюванні яких переважну роль відіграє основний ромбоедр {10$\bar{1}$1} (рис. 2а–в). На його гранях фіксуються скульптури росту у вигляді тонких сходинок різної висоти (рис. 2, г). Для ромбоедричних граней приплюснутих кристалів характерні численні рельєфні сходинки поліцентричного росту різного розміру (рис. 2г–е) та сліди розчинення у вигляді каверн неправильної форми.

Окрім кальциту та олігоніту, типовими мінералами асоціації тріщинної мінералізації є також прозорий кварц, халцедон та пірит (рис. 3). Останній формує поодинокі напівсфероліти, що наростають на щітки кристалів олігоніту та фрамбоїдально-подібні агрегати (рис. 3г).

За результатами досліджень тріщинної вторинної мінералізації Рафалівського базальтового кар'єру можна припустити, що накладена карбонатна мінералізація формувалася в базальтах у дві стадії: у першу стадію утворився кальцит разом із кварцом, вистилаючи поверхні порожнин і тріщин, у другу – надходили розчини, вже збагачені манганом і тому кристалізувалися олігонітова кірка-плівка на кальциті і щітки багатогранників олігоніту та виділення піриту.

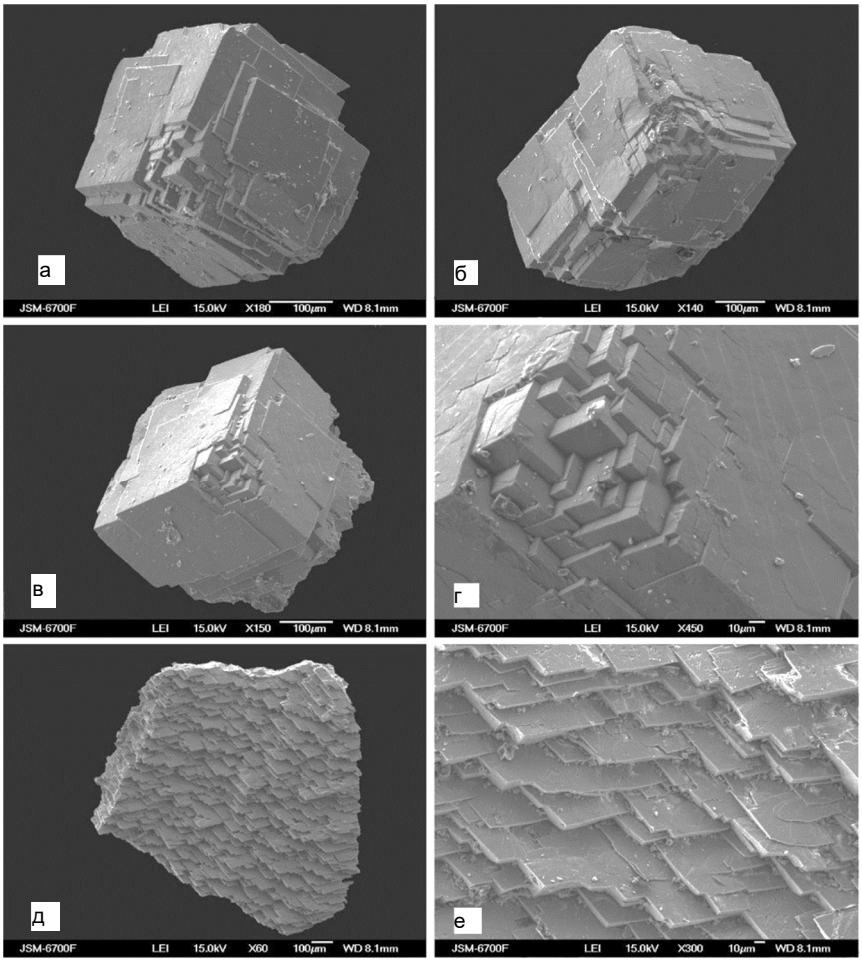


Рис. 2. Кристаломорфологія та особливості мікрорельєфу граней кристалів Mn-сидериту з тріщинної вторинної мінералізації (Рафалівське родовище базальтів, Західна Волинь):
а–в – ромбоедричні кристали, г–е – сходинки на поверхні граней (растровий електронний мікроскоп JSM-6700 F)

ISSN 1728-3817

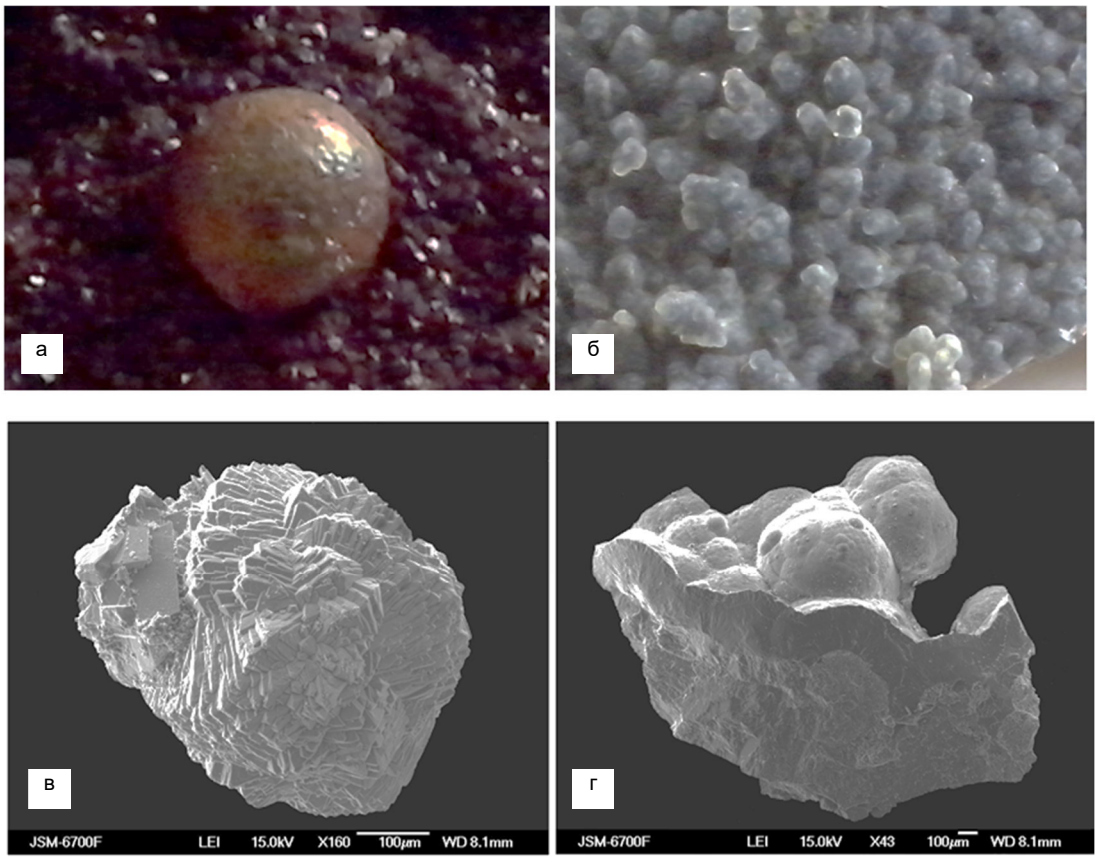


Рис. 3. Мінерали-супутники сидериту з тріщинної вторинної мінералізації (Рафалівське родовище базальтів, Західна Волинь): сферичні утворення піриту (а), натічні форми халцедону (б); фрамбоїдально-подібні агрегати піриту (в) і натічні агрегати халцедону (г) (растровий електронний мікроскоп JSM-6700 F)

Дискусія і висновки

Отже, морфологія виділень сидериту характеризується значною розмаїтістю: тонкодисперсні частинки, зерна різної розмірності, пластинчасті, обкатані, часто ідіоморфні; тонкозернисті прошарки, жили, лінзи різної потужності, гнізда, друзові утворення, мономінеральні конкреції (сферолітової і оолітової будови, жовна), які майже повністю складені сидеритом або він входить до їх складу як переважна компонента, виділення неправильної форми, часто сидерит виступає як цемент або входить до його складу. Добре сформовані кристали трапляються рідше. Як видно з табл. 2, набір простих форм габітусного значення на кристалах сидериту невеликий: це здебільшого ромбоедри, пінакоїди, на окремих кристалах – скаленоедри і призми. Для деяких кристалів характерний своєрідний мікрорельєф граней – черепитчасті, черепитчасто-конусні структури, скульптури росту у вигляді сходинок та такі, що нагадують риб'ячу луску; каверни як форми розчинення.

Дослідження морфології сидериту з різних мінералого-петрографічних комплексів України дають змогу краще зрозуміти умови генезису сидериту та особливості процесів, що сприяли його кристалізації. Вивчення рельєфу на гранях кристалів сидериту допомагає виявити механізми росту та надає цінну інформацію про еволюції кристалів, а саме про їх зміни під впливом зовнішніх чинників.

Список використаних джерел

Деревська, К. І., Безугла, М. В., Август, Ч., Приходько, В. Л., & Александров, О. Л. (2001). Закономірності розміщення самородномідної та супутньої мінералізації в межах Рафалівської рудоносної площі. *Доповіді НАН України*, 12, 101–105.

Квасниця, І. В., Павлишин, В. І., & Косовський, Я. О. (2009). *Самородна мідь України. Геологічна позиція, мінералогія і кристалогенезис*. Логос.

Лазаренко, Е. К., Лавриненко, Л. Ф., Бучинская, Н. И. та ін. (1980). *Минералогия Приазовья*. Наукова думка.

Лазаренко, Е. К., Лазаренко, Э. А., Барышников, Э. К., & Малыгина, О. А. (1963). *Минералогия Закарпатья*. Вид-во Львовского ун-та.

Лазаренко, Е. К., Панов, Б. С., & Павлишин, В. И. (1975). *Минералогия Донецкого бассейна* (Частина 2). Наукова думка.

Лазаренко, Є. К., & Сребродольський, Б. І. (1969). *Мінералогія Поділля*. Видавництво Львівського університету.

Лазаренко, Є. К., Габінет, М. П., & Сливко, О. П. (1962). *Мінералогія осадочних утворень Прикарпаття*. Видавництво Львівського університету.

Лазаренко, Є. К., Матковський, О. І., Винар, О. М., Шашкіна, В. П., & Гнатів, Г. М. (1960). *Мінералогія виверженних комплексів Західної Волині*. Видавництво Львівського університету.

Матковський, О. (2013). Телур-бісмутова і бісмут-молібденова мінералізація у вулканітах Вигорлат-Гутинського пасма (Закарпаття). *Мінералогічний збірник*, 63(2), 64–75.

Матковський, О. І. (Ред.). (2003). *Мінерали Українських Карпат. Борати, арсенати, фосфати, молібдати, сульфати, карбонати, органічні мінерали і мінералоїди*. Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка.

Матковський, О., Павлишин, В., & Сливко, Є. (2009). *Основи мінералогії України*. Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка.

Мельничук, В. (2004). Гідротермальна мінералогічна зональність та метаморфізм у міденосних трапах нижнього венду Волино-Подільської плити. 54(2), 131–142.

Цільмак, О. В., Скакун, Л. З., Литвинович, О. Р., & Серкіз, Р. Я. (2008). Мінералогія карбонатів Бобриківського золоторудного родовища та їхнє місце у формуванні полімінерального агрегату. *Вісник Львівського університету. Серія геологічна*, 22, 30–41.

Щербак, Н. П. (Ред). (1990). *Минералы Украины. Краткий справочник* Наукова думка.

Dana, D. (1922). *System of Mineralogy*. John Willey & Sons, Inc.

References

Dana, D. (1922). *System of Mineralogy*. John Willey & Sons, Inc.

Derevskaya, K. I., Bezugla, M. V., August, C., Prikhodko, V. L., & Aleksandrov, O. L. (2001). Patterns of distribution of native and associated mineralization within the Rafalivska ore-bearing area. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 101–105.

Kvasnytsia, I. V., Pavlyshyn, V. I., & Kosovskyi, Y. O. (2009). *Native copper of Ukraine. Geological position, mineralogy and crystallogenesis*. Logos.

Lazarenko, E. K., & Srebrodolsky, B. I. (1969). *Mineralogy of Podillya*. Lviv University Press.

Lazarenko, E. K., Habinet, M. P., & Slyvko, O. P. (1962). *Mineralogy of sedimentary formations of the Carpathian region*. Lviv University Press.

Lazarenko, E. K., Lavrinenko, L. F., Buchinskaya, N. I. et al. (1980). *Mineralogy of the Pryazov'ya*. Naukova dumka.

Lazarenko, E. K., Lazarenko, E. A., Baryshnikov, E. K., & Malygina, O. A. (1963). *Mineralogy of Transcarpathia*. Lviv University Press.

Lazarenko, E. K., Matkovsky, O. I., Vinar, O. M., Shashkina, V. P., & Hnativ, G. M. (1960). *Mineralogy of the eruptive complexes of Western Volyn*. Lviv University Press.

Lazarenko, E. K., Panov, B. S., & Pavlyshyn, V. I. (1975). *Mineralogy of the Donetsk Basin* (Part 2). Naukova dumka.

Matkovsky, O. (2013). Tellurium-bismuth and bismuth-molybdenum mineralisation in volcanites of the Vyhorlat-Gutynska Ridge (Transcarpathia). *Mineralogical Review*, 63(2), 64–75.

Matkovsky, O. I. (Ed.). (2003). *Minerals of the Ukrainian Carpathians. Borates, arsenates, phosphates, molybdates, sulphates, carbonates, organic minerals and mineraloids*. Publishing Centre of Ivan Franko National University of Lviv.

Matkovsky, O., Pavlyshyn, V., & Slivko, E. (2009). *Fundamentals of Mineralogy of Ukraine*. Publishing Center of Ivan Franko National University of Lviv.

Melnychuk, V. (2004). Hydrothermal mineralogical zoning and metamorphism in the Lower Vendian copper-bearing traps of the Volyn-Podolsk Plate. 54(2), 131–142.

Shcherbak, N. P. (Ed.). (1990). *Minerals of Ukraine. A brief reference book* Naukova dumka.

Tsilmak, O., Skakun, L., Lytvynovych, O., & Serkiz, R. (2008). Mineralogy of carbonates and their place in a polimineral agregate of the Bobrykove gold deposit. *Visnyk lviv univ. Ser. Geol.*, 22, 30–41.

Отримано редакцією журналу / Received: 06.11.24
Прорецензовано / Revised: 09.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Iryna KVASNYTSIA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0738-4599
e-mail:ikvasnytsia@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MORPHOLOGY OF SIDERITE FROM GEOLOGICAL FORMATIONS OF UKRAINE

Background. ***Carbonates are fairly common minerals in Ukraine, with calcite, siderite, rhodochrosite, dolomite and davsonite being the most important and widespread. Siderite is mainly represented by three types - siderite, Mg-siderite (sideroplesite) and Mn-siderite (manganese siderite, oligonite). Despite the fact that siderite has been found in many geological formations in Ukraine, information on the morphology of the mineral is rather limited. This paper systematises and analyses the existing data on the morphology of siderite in the geological formations of Ukraine. The results of the study of new finds of Mn-siderite (oligonite), which have recently been found in numerous occurrences of fractured secondary mineralisation of the eastern part of the Rafalivske basalt deposit (Western Volyn) within the Volyn-Podilsk trap formation of the Lower Vendian of the East European Platform, are presented.***

Methods. ***Goniometric (double-circle goniometer GD-1), electron microscopy (electron microscope JSM-6700F (JEOL, Japan) equipped with an energy dispersive system for X-ray microanalysis JED-2300 (JEOL, Japan)) and X-ray diffraction (diffractometer DRON-2(3M)) methods were used to study Mn-siderite crystals from Volyn basalts.***

Results. ***Siderite from the geological formations of Ukraine is characterised by considerable morphological diversity: individual fine particles and lamellar, rolled, often idiomorphic grains of various sizes, as well as fine-grained layers, veins, lenses of various thicknesses, nests, druse, nodules, concretions (spherolite and oolitic aggregates), which are almost entirely composed of siderite or it is the predominant component, irregularly shaped aggregates, often the mineral acts as a cement or is part of it. Well-formed crystals are rare. The list of simple habit forms on siderite crystals is short: rhombohedra, pinacoids, and in some cases, scalenohedrons and prisms. Some crystals have a peculiar microrelief of their faces, in particular, tiled, tiled-cone structures, growth sculptures in the form of steps and those resembling fish scales; also cavities as forms of dissolution.***

Conclusions. ***Studies of the morphology of siderite from different mineralogical and petrographic complexes of Ukraine allow us to better understand the conditions of siderite genesis and the peculiarities of the processes that contributed to its crystallisation. The study of the microrelief on the faces of siderite crystals helps to identify growth mechanisms and provides valuable information about the evolution of crystals, namely their changes under the influence of external factors.***

Keywords: ***carbonates, siderite, oligonite, morphology, Rafalivska, geological formations of Ukraine.***

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 553.5
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.10

Олег ГЕЛЕТА, канд. геол. наук, чл.-кор. Академії будівництва України
ORCID ID: 0000-0002-3583-7885
e-mail: olgel@gems.org.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ігор СЕРГІЄНКО, магістр геохімії і мінералогії
ORCID ID: 0009-0002-2214-1982
e-mail: sia.gems@gmail.com
Державний гемологічний центр України, Київ, Україна

УПРАВЛІННЯ ЯКІСНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВИРОБІВ З ЛАБРАДОРИТУ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА ШЛЯХОМ УРАХУВАННЯ ТИПІВ ОБРОБКИ ЇХ ПОВЕРХНІ

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

Вступ. *Довговічність є однією з ключових характеристик декоративного каміння, оскільки вона визначає термін служби виробів із цього матеріалу. Вона залежить не лише від петрографічної будови каменю, але й від типу фактурної обробки поверхні. Лабрадорит, різновид анортозиту, завдяки своїй міцності і морозостійкості широко використовують у будівництві та декоративному оздобленні. Різні методи обробки поверхні виробів з лабрадориту, такі як термообробка, обробка дробом і водоструминна обробка, поліпшують не тільки естетичні властивості каменю, а й його функціональність, зокрема протиковзкі характеристики. Дослідження цих методів обробки є важливим для визначення їх впливу на довговічність виробів з декоративного каміння.*

Методи. *У рамках даного комплексу досліджень проведено ряд експериментів із застосуванням обладнання, передбаченого ДСТУ Б EN 13755:2007 "Методи випробування природного каменю. Визначення водопоглинання при атмосферному тиску" та за допомогою електронного ультразвукового п'єзоелектричного дефектоскопа MATEST C372N.*

Результати. *Детально вивчено вплив деяких типів протиковзної обробки поверхні виробів з лабрадориту двох родовищ Українського щита на їх довговічність, яка є однією з ключових споживчих характеристик якості кам'яних оздоблювальних матеріалів. В основу досліджень покладено виявлення взаємозв'язку між збільшенням показника водопоглинення і погіршенням стану збереженості та застосованими типами обробки поверхні зразків лабрадориту з родовищ Кам'яна Піч і Слобідське – обробка дробом, обробка струменями води під тиском або обпалення вогнем (термообробка). Лабораторні дослідження показали, що водоструминна обробка є найменш руйнівною, тоді як термообробка і обробка дробом значно погіршують фізико-механічні властивості лабрадориту, підвищуючи його водопоглинення і знижуючи довговічність.*

Висновки. *Результати проведених досліджень демонструють необхідність обґрунтованого вибору технології обробки залежно від умов його подальшого використання. Важливо враховувати ці аспекти не лише на етапі вибору матеріалу декоративного каміння, але й на стадії проєктування та реалізації архітектурних рішень, де довговічність виробів з природного каміння впливатиме на загальну естетику і функціональність архітектурного об'єкта. Отримані дані є важливими для обґрунтованого вибору технологій обробки каменю у будівництві та архітектурі, забезпечуючи баланс між естетичними властивостями та експлуатаційною стійкістю матеріалу.*

Ключові слова: *лабрадорит, тип обробки поверхні, декоративне каміння, Український щит, водоструминна обробка, обробка дробом, обпалення вогнем, термообробка.*

Вступ

Серед споживчих якісних характеристик декоративного каміння довговічність посідає одне з чільних місць, оскільки визначає терміни і ресурс практичної експлуатації виробів, виготовлених із цього природного матеріалу. Довговічність декоративного каміння – багатофакторна характеристика, що залежить не лише від його петрографічної будови, мінерального складу, умов експлуатації виробів з нього, їх додаткового гідрофобного покриття, але також і від типу фактурної обробки поверхні.

Лабрадорит – це магматична гірська порода основного складу, різновид анортозиту, яка має темно-сіре до майже чорного забарвлення, складена до 95 % основним плагіоклазом (лабрадором) та невеликою кількістю темноколірних мінералів (піроксен, олівін, апатит, магнетит, ільменіт, рідше – калієвий польовий шпат, кварц, біотит, сульфіди заліза). Структура лабрадоритів переважно крупно-, гігантозерниста. Текстура масивна. Характерною діагностичною ознакою лабрадориту є іризація (лабрадорисценція) – оптичний ефект у вигляді переливів блакитного, синього, зеленого, жовтого кольорів при зміні кута освітлення мінералу або породи (Гелета, & Сергієнко, 2006). Оскільки лабрадорит не містить кварцу, він, на відміну від граніту, легше обробляється, є міцним і морозостійким оздоблювально-будівельним матеріалом. Широко застосовується для зовнішнього облицювання і мощення, виготовлення стільниць, архітектурно-будівельних виробів, постаментів, бруківки. Густина лабрадоритів – 2,7–2,95 т/м^3 (Гелета, & Захарченко, 2017).

Автори вже здійснювали дослідження на предмет початкових стадій вивітрювання лабрадоритів у виробах та архітектурних пам'ятках України (Гелета, & Сергієнко, 2011) і стійкості до вивітрювання основних типів лабрадоритів Українського щита (Гелета, & Сергієнко, 2012). Негативним фактором для лабрадориту є наявність у його складі домішок залізовмісних мінералів, які при окисненні утворюють на поверхні каменю іржаво-брунатні плями (Гелета, & Сергієнко, 2012).

В Україні лабрадорити входять до складу анортозит-рапаківі-гранітної формації і поширені в межах Коростенського (Житомирська область) і Корсунь-Новомиргородського (Черкаська і Кіровоградська області) плутонів Українського щита (УЩ). В Україні виявлено понад 40 родовищ лабрадоритів та анортозитів, з яких розробляють близько 10–12. На світовому ринку найвідомішими є лабрадорити Осниківського, Головинського, Очеретянського, Добринського, Слобідського, Кам'янобрідського родовищ, розташованих у Житомирській області (Гелета, & Сергієнко, 2005).

Відомо, що вироби з декоративного каміння з полірованою поверхнею демонструють найвищий рівень довговічності, оскільки такий тип фактурної обробки суттєво зменшує сприйнятливість до негативного впливу зовнішніх факторів навколишнього середовища (Семенченко та ін., 1974). Відповідно різні типи обробки поверхні виробів з декоративного каміння також мають і певне художньо-естетичне чи функціональне призначення.

© Гелета Олег, Сергієнко Ігор, 2025

Наприклад, полірована фактура, окрім забезпечення найбільшої довговічності каміння, ще й найкраще проявляє його колір і текстурний рисунок.

Натомість у виробах і природного каміння, призначених для мощення тротуарів, доріжок, сходів, сходових майданчиків тощо застосовують фактури обробки, які забезпечують неслизьку поверхню покриття. До основних типів такої обробки належать термооброблена, водоструминна, абразивна, бучардована, рифлена та ін. Такі типи обробки також використовують для накривних плит і облицювальних плит в оздобленні цоколів будинків (Гелета, & Захарченко, 2017).

Обпалена полум'ям поверхня (або термооброблена, flame-treated (thermally treated) – це фактура обробки поверхні декоративного каміння, утворена внаслідок її обпалення вогняними струменями при температурних показниках в межах 2300–2700 °С. За такогоу високотемпературного впливу породотвірні мінерали гірської породи частково руйнуються, утворюючи у результаті рівномірно-шорстку поверхню з перепадом рельєфу до 10 мм. Зазначена технологія обробки є нині найпоширенішою в Україні при виготовленні виробів з декоративного каміння з нековзкими поверхнями для зовнішнього мощення, має певні естетичні якості і найнижчу собівартість. Проте такий високоенергетичний вплив на поверхню виробів вимагає детального аналізу з погляду впливу на довговічність.

Оброблена дробом поверхня (shot-blasted finish) – це специфічний різновид піскоструминної обробки (sand blasted finish) декоративного каміння. Однак, на відміну від традиційного використання абразивного матеріалу у вигляді піску, у цьому випадку застосовують дріб із заліза або чавуну. Цей метод обробки, у процесі якого металевий дріб здійснює механічний вплив на верхній шар каменю, руйнуючи його при цьому, приводить до утворення рівномірно-шорсткої поверхні з відмінними естетичними і функціональними характеристиками. Металевий дріб, зокрема, завдяки своїй структурі і формі, дає змогу досягти високого рівня однорідності обробленої поверхні, що в подальшому позитивно впливає на декоративність поверхні та експлуатацію виробів. Зазначена технологія обробки менше поширена, ніж термообробка, оскільки передбачає застосування спеціального обладнання і, відповідно, дорожча.

Водоструминна обробка (water jet streamed finish) – це технологія, яка передбачає обробку поверхні декоративного каміння струменями води під високим тиском. Цей метод дає змогу досягти значно вищої точності обробки, оскільки струмінь води може проникати в найменші деталі і нерівності поверхні виробів, утворюючи при цьому ідеально однорідну матову текстуру без шкоди для структурної цілісності матеріалу (Гелета, & Захарченко, 2017).

Описані вище типи обробки поверхні, незважаючи на свої специфічні технологічні особливості, мають однакове функціональне призначення – ефективно забезпечувати протиковзні характеристики поверхні виробів з декоративного каміння. Ці властивості надзвичайно важливі для забезпечення безпеки під час експлуатації виробів, особливо в зонах з підвищеним ризиком падіння пішоходів в умовах обледеніння поверхні.

Крім того, ці типи обробки також можуть бути застосовані для створення естетичного ефекту старожитності виробів, що робить їх популярними в сучасному дизайні інтер'єрів та екстер'єрів. Отже, інтеграція цих видів обробки поверхні у виробничі каменярські процеси забезпечує не лише підвищення функціональності, а й поліпшення естетичних якостей виробів з декоративного каміння.

Враховуючи, що такі вироби використовуються зазвичай у зовнішньому середовищі і постійно зазнають фізичних навантажень та атмосферно-кліматичного впливу, важливо дослідити їх потенційний експлуатаційний ресурс залежно від застосованих певних типів обробки поверхні.

Методи

Для вирішення визначених питань щодо дослідження впливу різних типів обробки поверхні виробів з лабрадоритів на їх якісні характеристики, автори провели комплексний аналіз показників водопоглинення і результатів ультразвукової діагностики стану збереженості зразків із поверхнями, які попередньо були обпалені полум'ям (термооброблені), оброблені дробом і оброблені струменями води під тиском (водоструминна обробка) відповідно до пункту 4.1.8.2 ДСТУ EN 1469:2007 "Вироби з природного каменю. Облицювальні плити. Вимоги" (Гелета, 2012).

Поверхня тильних і бічних сторін цих зразків мала пиляну фактуру обробки, що забезпечило рівномірність і однорідність їх початкової текстури. Дані зразки у вигляді плиток квадратної форми з розмірами бічних сторін 0,13*0,13 м було виготовлено з лабрадориту родовищ Кам'яна Піч і Слобідське (Житомирська обл.), розташованих у межах Коростенського плутону УЩ.

Як еталонні зразки використано плитки з лабрадориту цих же родовищ з полірованою лицевою поверхнею та аналогічними формою і розмірами.

Дослідження водопоглинення зразків лабрадоритів із родовищ Кам'яна Піч і Слобідське з обпаленою (термооброблена), обробленою дробом і водоструминною поверхнями проведено відповідно до вимог ДСТУ Б EN 13755:2007 "Методи випробування природного каменю. Визначення водопоглинання при атмосферному тиску".

Дослідження стану збереженості зразків лабрадориту родовищ Кам'яна Піч і Слобідське з обпаленою (термооброблена), обробленою дробом і водоструминною поверхнями обробки проводилось відповідно до "Методики визначення стану збереженості пам'яток з декоративного каміння України", затвердженої наказом Державного гемологічного центру України від 12.01.2015 № 2/15-5, яка передбачає використання ультразвукового зондування та електронних ультразвукових п'єзоелектричних дефектоскопів. Для проведення досліджень використано електронний ультразвуковий п'єзоелектричний дефектоскоп MATEST C372N, що працює на частоті ультразвукових коливань 55 кГц.

Результати

Ключовим фактором, який безпосередньо впливає на довговічність декоративного каміння, є його водопоглинення, адже волога при проникненні в пори та тріщини, утворені в результаті природних і технологічних впливів, розширюється при замерзанні, тим самим порушуючи цілісність гірської породи та спричиняючи процеси поверхневого, а згодом і внутрішнього руйнування, особливо в умовах, що супроводжуються коливаннями температури біля позначки 0 °С.

Таким чином, підвищена пористість і тріщинуватість гірських порід спричиняють зростання водопоглинення, що негативно впливає на довговічність виробів.

Для порівняння якісних характеристик автори обрали поліровані зразки з полірованою поверхнею, оскільки при такому типу обробки гірська порода зазнає найменшого руйнувального впливу і забезпечує відносну цілісність та найбільшу довговічність (Семенченко та ін., 1974). Це пояснюється тим, що при обробці поверхні виробів поліруванням, на відміну від інших фактур (пиляної, термообробленої, колотої та ін.), найкраще

закриваються мікропори і капіляри, по яких волога може проникати в гірську породу.

У результаті отримано показники (табл. 1), на основі яких зроблено якісний порівняльний аналіз та оцінку властивостей матеріалу.

Загалом виявлено чітку тенденцію для лабрадоритів і з родовища Кам'яна Піч, і зі Слобідського родовища щодо збільшення водопоглинання зразків залежно від застосованого типу їх обробки. Відмічено, що найменш руйнівний характер на гірську породу має водоструминна обробка, більш руйнівний – оброблена дробом, а найбільш руйнівний – обпалення вогнем (термообробка) (рис. 1). Встановлено, більш різке збільшення водопоглинання у зразків з обпаленою і обробленою дробом поверхнями. Для лабрадориту родовища Кам'яна Піч у зразках з обпаленою і обробленою дробом поверхнями фіксується вдвічі більше водопоглинення, ніж у зразків лабрадориту Слобідського родовища, що пояснюється більш крупнозернистою структурою породотвірних мінералів останнього.

Аналіз взаємозв'язку між водопоглинанням і довговічністю є важливим аспектом досліджень для подальшого розвитку технологій обробки та використання декоративного каміння в будівництві й архітектурі, оскільки це суттєво впливатиме на вибір матеріалів та типу їх обробки відповідно до умов експлуатації виробів. Визначення цих аспектів надає цінну інформацію для інженерів і архітекторів, які прагнуть досягти оптимального поєднання естетичних якостей і довговічності у своїх проєктах.

Таблиця 1

Показники водопоглинання при атмосферному тиску (A_b) зразків лабрадоритів з родовищ Кам'яна Піч і Слобідське та їх порівняння з еталонними зразками

№	Родовище	Тип обробки поверхні	Показник водопоглинання (A_b), % мас.	Збільшення водопоглинання відносно еталонного зразку (рази)
1	Кам'яна Піч	полірована (еталонний зразок)	0,027	1,00
2		водоструминна обробка	0,047	1,74
3		оброблена дробом	0,121	4,48
4		обпалена (термооброблена)	0,127	4,70
5	Слобідське	полірована (еталонний зразок)	0,044	1,00
6		водоструминна обробка	0,076	1,73
7		оброблена дробом	0,102	2,32
8		обпалена (термооброблена)	0,113	2,57

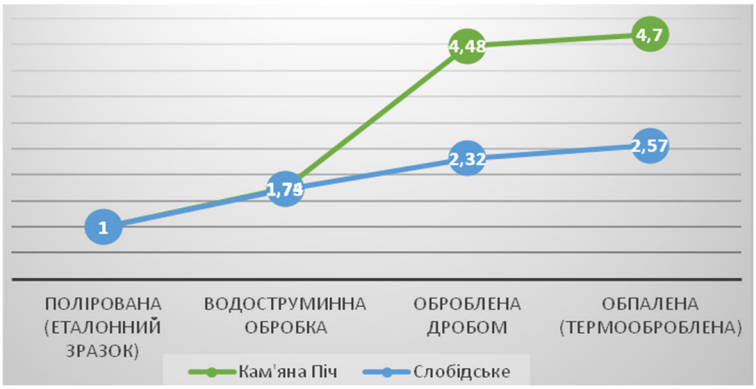


Рис. 1. Зростання показника водопоглинання (вісь Y) лабрадоритів родовищ Кам'яна Піч і Слобідське відносно еталонного зразка залежно від типу обробки поверхні (вісь X)

"Методика визначення стану збереженості пам'яток з декоративного каміння України", затверджена наказом Державного гемологічного центру України від 12.01.2015 № 2/15-5, базується на принципі акустичного зондування, що дає змогу отримати інформацію про механічні властивості матеріалу і, порівняно з еталонами, про стан збереженості виробу з декоративного каміння.

Швидкість пружних ультразвукових хвиль (V') обчислюється за формулою, що є результатом ділення відстані між випромінювачем і детектором (L) на мінімальний час проходження хвилі (t), який фіксує спеціалізований прилад:

$$V'=L/t \quad (1)$$

Цей параметр є критично важливим для подальшого аналізу стану зразків, оскільки швидкість поширення хвиль безпосередньо пов'язана з механічною жорсткістю матеріалу.

Параметром, що характеризує ступінь збереженості матеріалу зразків лабрадоритів, є акустичний коефіцієнт (K_a). Цей коефіцієнт визначається як відношення швидкості пружних хвиль, виміряних на досліджуваному об'єкті (V'), до швидкості, зафіксованої в еталонних зразках (V):

$$K_a=V'/V \quad (2)$$

Такий підрахунок дає змогу провести детальну оцінку ступеня деградації матеріалу та визначити можливі зміни у фізико-механічних властивостях лабрадоритів унаслідок різних методів обробки.

Чим більшою є кількість поверхневих і внутрішніх руйнувань у матеріалі досліджуваних зразків лабрадориту, тим нижчим буде значення акустичного коефіцієнта (K_a). У разі відсутності внутрішніх руйнувань у матеріалі декоративного каміння, значення K_a дорівнює одиниці, що свідчить про ідеальний стан збереженості. Однак за збільшення обсягу та ступеня руйнувань значення акустичного коефіцієнта K_a буде наближатися до нуля. Це свідчить про загальну деградацію матеріалу, яка може суттєво вплинути на його експлуатаційні характеристики та термін служби.

Дослідження за допомогою акустичного зондування дало змогу здійснити точну оцінку стану збереженості зразків лабрадоритів шляхом порівняння швидкості поширення пружних хвиль Релея у матеріалі досліджуваних зразків лабрадоритів, які зазнали обробки

обпаленням (термообробка), дробом та струменями води, відносно еталонних зразків лабрадоритів, які мали полірову поверхню.

За результатами досліджень стану збереженості зразків лабрадоритів родовищ Кам'яна Піч і Слобідське отримано числові показники акустичного коефіцієнта, наведені в табл. 2.

Дослідження стану збереженості зразків лабрадориту родовищ Кам'яна Піч і Слобідське продемонстрували, що найменшого руйнівного впливу на цілісність гірської породи зазнали вироби з водоструминною обробкою поверхні – для обох родовищ зафіксовано акустичний коефіцієнт (K_a), що дорівнює 0,93 відносно еталонного зразка.

Натомість значно гіршими виявилися показники збереженості для зразків, які мали поверхню, оброблену дробом, у яких акустичний коефіцієнт (K_a) відносно значень еталонного зразка становив 0,87 для родовища Кам'яна Піч і 0,84 для Слобідського родовища. Це свідчить про те, що обробка дробом, хоч і є ефективною в контексті естетичних характеристик, але суттєво знижує механічну цілісність матеріалу, що негативно впливатиме на його довговічність.

Найгірші показники збереженості виявилися у зразків, що мали обпалену вогнем (термооброблену) поверхню – у них акустичний коефіцієнт (K_a) відносно значень еталонного зразка зафіксовано на рівні 0,65 у родовища Кам'яна Піч і 0,50 у Слобідського родовища.

Результати аналізу, отримані в процесі порівняння акустичних властивостей, можуть слугувати основою для подальших досліджень у сфері матеріалознавства та технологій обробки декоративного каміння, оскільки забезпечують важливу інформацію для вибору оптимальних методів обробки, що сприяють максимальному збереженню фізичних і механічних властивостей кам'яних матеріалів. Також ці дані можуть бути корисними для практичного застосування в будівництві та архітектурі, де особливо важлива довговічність і стійкість до впливу навколишнього середовища.

Таблиця 2

Показники акустичного коефіцієнта зразків лабрадориту родовищ Кам'яна Піч і Слобідське (акустичний коефіцієнт K_a)

№	Родовище	Тип обробки поверхні	Швидкість (V'), км/с	Акустичний коефіцієнт (K_a) відносно еталонного зразка (рази)
1	Кам'яна Піч	полірована (еталонний зразок)	5,25	1,00
2		водоструминна обробка	4,87	0,93
3		оброблена дробом	4,58	0,87
4		обпалена (термооброблена)	3,40	0,65
5	Слобідське	полірована (еталонний зразок)	5,01	1,00
6		водоструминна обробка	4,66	0,93
7		оброблена дробом	4,19	0,84
8		обпалена (термооброблена)	2,50	0,50

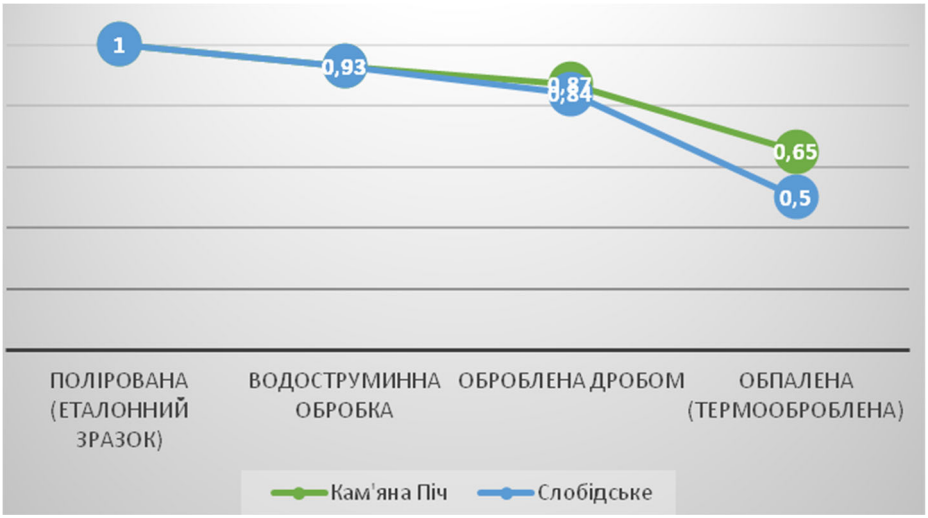


Рис. 2. Зниження акустичного коефіцієнта (вісь Y) лабрадоритів родовищ Кам'яна Піч і Слобідське відносно еталонного зразка залежно від типу обробки поверхні (вісь X)

Згідно з даними, наведеними в літературних джерелах (Семенченко та ін., 1974), довговічність лабрадоритів може варіюватися в межах від 220 до 350 років. Ці показники, однак, стосуються зразків, які не зазнали впливу різних процесів, що призводять до поверхневого і внутрішнього руйнування декоративного каміння. Але реальна тривалість служби декоративного каміння в умовах експлуатації, як ми бачимо з проведених досліджень, може бути значно нижчою залежно від вибраного типу обробки виробів.

У зв'язку із цим у табл. 3 представлено прогнозований термін імовірного ресурсу експлуатації (довговічності) виробів з лабрадориту родовищ Кам'яна Піч і Слобідське (Житомирська обл.) після обробки їх поверхні за допомогою таких технологій, як водоструминна, обробка дробом і обпалена вогнем (термообробка). Це прогнозування ґрунтується на аналізі отриманих експериментальних даних стану збереженості, які дають змогу оцінити, як кожен з описаних методів обробки впливає на якісні характеристики лабрадориту, зокрема його здатність протистояти таким факторам, як волога, температурні коливання, механічні навантаження та ін., що спричиняють руйнування декоративного каміння.

ISSN 1728-3817

Таблиця 3

Прогнозований термін імовірного ресурсу експлуатації (довговічності) лабрадоритів родовищ Кам'яна Піч і Слобідське після водоструминної обробки, обробки дробом і обпаленням вогнем

Родовище	Характеристика / прогнозований термін довговічності	Тип обробки поверхні			
		полірована (еталон)	водоструминна	дробом	обпалена (термооброблена)
Кам'яна Піч	A_b (водопоглинення)	1,00	1,74	4,48	4,70
	K_a (акустичний коефіцієнт)	1,00	0,93	0,87	0,65
	роки	220–350	205–326	191–305	143–228
Слобідське	A_b (водопоглинення)	1,00	1,73	2,32	2,57
	K_a (акустичний коефіцієнт)	1,00	0,93	0,84	0,50
	роки	220–350	205–326	185–294	110–175

Результати проведених досліджень демонструють, що різні типи обробки поверхні мають безпосередній вплив на збереженість і довговічність декоративного каміння, що підкреслює необхідність обґрунтованого вибору технології обробки залежно від умов його подальшого використання. Важливо враховувати ці аспекти не лише на етапі вибору матеріалу, але і на стадії проєктування та реалізації архітектурних рішень, де довговічність виробів із декоративного каміння може вплинути на загальну естетику і функціональність об'єктів, оскільки різні типи обробки поверхні кам'яних виробів суттєво впливають на довговічність матеріалу через зміни в його водопоглиненні та структурній цілісності. Виявлена тенденція до зростання водопоглинення, особливо при термообробці або обробці дробом, свідчить про необхідність обережного підходу до застосування цих технологій. Це особливо актуально для зовнішніх конструкцій, які зазнають значного впливу атмосферних факторів, таких як волога, перепади температур і механічні навантаження.

Крім того, у будівництві вибір технології повинен враховувати не тільки функціональні, але й естетичні вимоги. Наприклад, термообробка забезпечує неслизьку поверхню і низьку вартість, але скорочує прогнозований термін експлуатації матеріалу. Водоструминна обробка, хоч і дорожча за собівартістю, показує кращі результати у збереженні механічної цілісності кам'яних виробів, що робить її доцільною для об'єктів, де довговічність є пріоритетом. Таким чином, отримані наукові дані дають змогу архітекторам і будівельникам обирати технології обробки поверхні залежно від умов експлуатації, забезпечуючи оптимальний баланс між естетикою, безпекою і тривалістю служби конструкцій.

Дискусія і висновки

Проведений комплекс досліджень водопоглинення і ультразвукової діагностики стану збереженості зразків лабрадориту з родовищ Кам'яна Піч і Слобідське (Житомирська область) дав змогу встановити залежність зміни внутрішньої цілісності гірської породи від застосованих типів фактурної обробки, зокрема обпалення полум'ям (термооброблена), обробки дробом і обробки струменями води під тиском (водоструминна).

Аналіз досліджень цих якісних характеристик підтвердив, що найбільш руйнівною обробкою для лабрадоритів є обпалення вогнем (термообробка). Це пояснюється зміною внутрішньої структури гірської породи внаслідок високотемпературного впливу, який призводить до зниження її механічної міцності.

Менш руйнівним є метод обробки дробом, який не завдає такої шкоди гірській породі, як термообробка.

Найменш негативного впливу на внутрішню цілісність лабрадориту завдає водоструминна обробка, що свідчить про її переваги в контексті збереження якісних характеристик при фактурній обробці декоративного каміння.

Враховуючи стан збереженості досліджуваних зразків лабрадориту після фактурної обробки, здійснено прогнозування термінів імовірного ресурсу їх експлуатації (довговічності) залежно від типу застосованої обробки лицевої поверхні.

Це дає змогу управляти якісними характеристиками лабрадоритів, обираючи відповідний метод обробки виробів із цього декоративного каміння. Водночас важливо відзначити, що ці висновки справедливі не лише для лабрадоритів УЩ, але й для інших петрографічних різновидів декоративного каміння. Це підкреслює важливість отриманих результатів та відкриває нові перспективи для подальших досліджень у сфері матеріалознавства.

Особливою перевагою проведеного дослідження є застосування акустичного зондування, яке забезпечує отримання як якісних, так і кількісних характеристик, що відображають стан внутрішньої структури матеріалу зразків декоративного каміння. Результати даного дослідження можуть слугувати основою для оптимізації технологічних процесів обробки декоративного каміння, що, у свою чергу, сприятиме підвищенню його експлуатаційних характеристик і довговічності в умовах реального використання в будівництві та архітектурі.

Внесок авторів: Олег Гелета – концептуалізація, розробка методології, математичний аналіз отриманих даних, написання (оригінальна чернетка); Ігор Сергієнко – лабораторні дослідження, інтерпретація даних, перегляд та редагування.

Подяки, джерела фінансування. Автори висловлюють щиру вдячність директору ТОВ "АКАМ" Олексію Міхєєву за люб'язно надані зразки для досліджень; Нікіті Касьянову та Микиті Царильнику – за технічну допомогу у виконанні лабораторних досліджень; Оксані Максюті – за літературне редагування тексту статті.

Список використаних джерел

Гелета, О.Л. (2012). На зміну Державних стандартів України на декоративне каміння прийшли Національні стандарти. *Коштовне та декоративне каміння*, 3(69), 21.

Гелета, О.Л., & Захарченко, П.В. (2017). *Товарознавство та експертна оцінка декоративного каміння*. Центр учбової літератури.

Гелета, О.Л., & Сергієнко, І.А. (2005). Лабрадорити України: головні споживчі властивості та петролого-технологічна класифікація. *Коштовне та декоративне каміння*, 1(39), 15–23.

Гелета, О.Л., & Сергієнко, І.А. (2006). Кількісна оцінка характеристик відносної споживчої якості лабрадоритів УЩ. *Коштовне та декоративне каміння*, 1(43), 9–14.

Гелета, О.Л., & Сергієнко, І.А. (2011). Дослідження початкових стадій вивітрювання лабрадоритів у виробах та архітектурних пам'ятниках України. *Коштовне та декоративне каміння*, 1(63), 23–25.

Гелета, О.Л., & Сергієнко, І.А. (2012). Дослідження та оцінка стійкості до вивітрювання основних типів лабрадоритів України. *Коштовне та декоративне каміння*, 2(68), 12–17.

ДСТУ Б EN 13755:2007. *Методи випробування природного каменю. Визначення водопоглинання при атмосферному тиску*. (2008). Державне підприємство "Укрархбудінформ".

Семенченко, Ю.В., Агафонова, Т.Н., Солонинко, И.С., Львова, Т.В., & Назаренко, В.В. (1974). *Цветные камни Украины*. Будівельник.

References

DSTU B EN 13755:2007. (2008). *Natural stone test methods – Determination of water absorption at atmospheric pressure*. Kyiv: State Enterprise "UkrArkhBudInform,".

Geleta, O.L. (2012). The State Standards of Ukraine for decorative stones were replaced by the National Standards. *Precious and decorative stones*, 3(69), 21.

Geleta, O.L., & Sergienko, I.A. (2005). Labradorites of Ukraine: main consumer properties and petrological-technological classification. *Precious and decorative stones*, 1(39), 15–23.

Geleta, O.L., & Sergienko, I.A. (2006). Quantitative assessment of the characteristics of the relative consumer quality of labradorites of the Ush. *Precious and decorative stones*, 1(43), 9–14.

Geleta, O.L., & Sergienko, I.A. (2011). Study of initial stages of labradorite weathering in products and architectural monuments of Ukraine. *Precious and decorative stones*, 1(63), 23–25.

Geleta, O.L., & Sergienko, I.A. (2012). Research and assessment of resistance to weathering of the main types of labradorites of Ukraine. *Precious and decorative stones*, 2(68), 12–17.

Geleta, O.L., & Zakharchenko, P.V. (2017). *Merchandising and expert assessment of decorative stones*. Center of educational literature.

Semenchenko, Y.V., Agafonova, T.N., Soloninko, I.S., Lvova, T.V., & Nazarenko, V.V. (1974). *Colored stones of Ukraine*. Builder.

Отримано редакцією журналу / Received: 18.12.24
Прорецензовано / Revised: 22.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Oleg GELETA, PhD (Geol.),
Corresponding Member of the Academy of Construction of Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3583-7885
e-mail: olgel@gems.org.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Igor SERGIIENKO, Master of Arts
ORCID ID: 0009-0002-2214-1982
e-mail: sia.gems@gmail.com
State Gemological Center of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MANAGEMENT OF THE QUALITY CHARACTERISTICS OF LABRADORITE PRODUCTS OF THE UKRAINIAN SHIELD TAKING INTO ACCOUNT THE TYPES OF THEIR SURFACE PROCESSING

Background. ***Durability is one of the key characteristics of decorative stone, as it determines the service life of products made from this material. It depends not only on the petrographic composition of the stone but also on the type of surface texture treatment. Labradorite, a variety of anorthosite, is widely used in construction and decorative finishing due to its strength and frost resistance. Different surface treatment methods for labradorite products, such as thermal treatment, abrasive blasting, and water jet treatment, enhance not only the aesthetic properties of the stone but also its functionality, particularly its anti-slip characteristics. The study of these treatment methods is essential for determining their impact on the durability of decorative stone products.***

Methods. ***A series of experiments were carried out as part of this research using equipment specified in the DSTU B EN 13755:2007 "Methods of Testing Natural Stone. Determination of Water Absorption under Atmospheric Pressure" and an electronic ultrasonic piezoelectric flaw detector MATEST C372N.***

Results. ***The impact of several types of anti-slip surface treatments on the durability of labradorite products from two deposits of the Ukrainian Shield has been studied in detail. Durability is one of the key consumer characteristics of the quality of stone finishing materials. The research aimed to identify the correlation between increased water absorption and deterioration of stone preservation, depending on the applied surface treatments of labradorite samples from the Kamiana Pich and Slobidske deposits–abrasive blasting, water jet treatment under pressure, and thermal treatment (fire treatment). Laboratory studies showed that water jet treatment is the least destructive, while thermal treatment and abrasive blasting significantly impair the physico-mechanical properties of labradorite, increasing its water absorption and reducing its durability.***

Conclusions. ***The results of the research highlight the need for a well-founded choice of treatment technology based on the conditions of further use. These aspects should be considered not only at the stage of selecting decorative stone material but also during the design and implementation of architectural solutions, as the durability of natural stone products will influence the overall aesthetics and functionality of the architectural object. The obtained data are important for the informed selection of stone treatment technologies in construction and architecture, ensuring a balance between aesthetic properties and the operational stability of the material.***

Keywords: ***labradorite, type of surface treatment, decorative stones, Ukrainian shield, water jet treatment, blast treatment, fire firing, heat treatment.***

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 550.382.3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.11

Яна МАЛЬКОВА[1], мол. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-6215-9901
e-mail: malkovayanakiev@gmail.com

Микола ПАНАСЮК[2], канд. техн. наук
ORCID ID: 0000-0003-3607-344X
e-mail: nipanasyuk53@gmail.com

Наталія СОСОННА[2], мол. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9913-3457
e-mail: natalyasosonnaya@gmail.com

Сергій БАГРІЙ[3], канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-1190-6222
e-mail: gbg2020@ukr.net

[1]ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України"
[2]Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН
[3]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ФІЛЬТРАЦІЇ ГРАВІЙНО-ГАЛЬКОВОГО АЛЮВІАЛЬНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ ЯК ОДНОГО З ОСНОВНИХ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРОГЕОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

Вступ. *Загроза забруднення джерел питного водопостачання Калуського регіону істотною мірою визначається затопленням Домбровського кар'єру та можливим витоком високомінералізованих розсолів у гравійно-гальковий водоносний горизонт та річкову мережу з поверхневих техногенних водойм. Сьогодні кар'єр слугує дреною для підземних вод, проте рівень води в гірничій виїмці підвищується зі швидкістю приблизно 1 м за рік, що потребує моніторингу, дослідження гідрогеологічної системи в зоні дренажного впливу кар'єру та швидких управлінських рішень для запобігання виникненню надзвичайної екологічної ситуації. Мета роботи полягала в тому, щоб запропонувати новий метод визначення коефіцієнта фільтрації (Кф), який би усереднював фільтраційні властивості великих масивів ґрунтів гравійно-галькового водоносного горизонту та враховував їх неоднорідність.*

Методи. *Для визначення усередненого коефіцієнта фільтрації для значної території використано балансові методи інструментального визначення надходження води в кар'єр та знайдено параметри для його розрахунку.*

Результати. *Проаналізовано та узагальнено всі наявні літературні та фондові джерела, застосовано комплексний підхід щодо визначення коефіцієнта фільтрації гравійно-галькового водоносного горизонту. З використанням рівняння Дарсі визначено, що Кф становить 5,3 м/добу. Запропоновано метод визначення коефіцієнта фільтрації ґрунтів водоносного горизонту з використанням ГІС-технологій визначення витрат потоку підземних вод, які повністю розвантажуються в кар'єр або в подібні водоймища. Результати дослідження використано при створенні чисельної геофільтраційної моделі та прогнозуванні засолення підземних вод.*

Висновки. *Вирішено актуальне наукове завдання дослідження гідрогеологічної системи Калуського регіону та визначення фільтраційних параметрів гравійно-галькового водоносного горизонту, що є єдиним джерелом питних вод для м. Калуш та прилеглих населених пунктів. Отримано коефіцієнт фільтрації гравійно-галькового водоносного горизонту I, II та III надзаплавних терас, що усереднює фільтраційні властивості ґрунтів на великий території і який можливо застосувати для виконання прогнозів засолення підземних вод.*

Ключові слова: *гравійно-гальковий водоносний горизонт, Калуш-Голинське родовище, коефіцієнт фільтрації, Домбровський кар'єр.*

Вступ

У районі Калуш-Голинського родовища калійних руд відбувається засолення єдиного питного гравійно-галькового водоносного горизонту. Цей процес пришвидшиться під впливом надходження розсолів із Домбровського кар'єру. Сьогодні Домбровський кар'єр є дреною для підземних вод, проте рівень води в кар'єрі неконтрольовано зростає за рахунок надходження атмосферних опадів та підземних вод зі швидкістю приблизно 1 м за рік. Через кілька років рівень у кар'єрі перевищить рівні підземних вод на прилеглій території. В результаті розсоли з кар'єру потраплятимуть до єдиного в цьому районі водоносного горизонту, який експлуатується Добрівлянським водозабором – єдиним джерелом питного водопостачання населення м. Калуш та навколишніх сіл. Для розробки проєктних та управлінських рішень щодо недопущення катастрофічного забруднення водоносного горизонту потрібно було створити математичну модель гідрогеологічних умов та виконати прогнози засолення водоносного горизонту. Але фільтраційні параметри гравійно-галькового водоносного горизонту, за літературними даними, відрізняються між собою на 3–4 порядки. Створити математичну модель із залученням літературних даних щодо фільтраційних властивостей ґрунтів водоносного горизонту навколо Домбровського кар'єру виявилося неможливим через відсутність надійних даних із визначеннюя коефіцієнта фільтрації. Зрозуміло, що визначити коефіцієнт фільтрації ґрунтів на території навколо Домбровського кар'єру стандартними методами доволі складно. Організувати досліди з відкачування води із свердловин хоча б по периметру Домбровського кар'єру, який має довжину близько 5 км, неможливо з технічних і фінансових причин.

Мета роботи полягала в тому, щоб запропонувати новий метод визначення коефіцієнта фільтрації, який би

© Малькова Яна, Панасюк Микола, Сосонна Наталія, Багрій Сергій, 2025

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

усереднював фільтраційні властивості великих масивів ґрунтів водоносного горизонту та враховував їх неоднорідність. Метод базується на використанні гідрогеологічних умов, за яких потік підземних вод цілком розвантажується в кар'єр (чи водосховище) по його береговій лінії. Підвищення рівня води в кар'єрі дає змогу визначити витрати потоку водоносного горизонту завширшки 4,8 км (периметр кар'єру). Коефіцієнт фільтрації визначається по формулі Дарсі при відомих витратах, ухилу та потужності потоку підземних вод.

Методи

Геологічна будова та гідрогеологічні умови. У фронтальній північно-східній частині Самбірського покриву, що входить до внутрішньої зони Передкарпатського прогину, розташоване Калуш-Голинське родовище калійних солей. Самбірський покрив, утворений нижніми і верхніми моласами, був зрушений зі своєї бази та зсунутий на зовнішню (Більче-Волицьку) зону прогину. Межа Стебницького насуву, що є межею Самбірського насуву, розташована на північному заході, недалеко від м. Калуш.

Геологічний розріз Калуш-Голинського родовища включає моноклінальне залягання соленосних товщ, яке ускладнене насувною та розломною тектонікою. Це призвело до поділу моласових відкладів на різні блоки, повторення розрізу та багаторазового відображення калійних покладів у соленосних товщах. Геологічний розріз родовища складається з порід стебницької світи, які перекриваються відкладами балицької світи і галицької серії. Стебницька світа переважно містить глини з прошарками пісковиків та алевролітів. Балицька світа поділяється на нижню і верхню частини. Нижній шар балицької світи складається з мергелів, під якими розташований соленосний пласт з гіпсоангідритовим горизонтом у підошві. Соленосна товща містить калійний пласт лангбейніт-каїнітового складу з домішками карналіту і сильвініту. У зоні вивітрювання порід соленосної товщі розташована гіпсо-глиниста "шапка" (ГГШ), яка має потужність від 3 до 30 м. Верхній шар балицької світи складається з глин, алевролітів і мергелів з прошарками галіту. Породи балицької світи перекриваються четвертинними гравійно-гальковими відкладами, суглинками та частково відкладами галицької серії. Серед цих порід виявлено карстові воронки діаметром від 0,3 до 1,0 м (Малькова та ін., 2020).

Гідрогеологічні умови характеризуються водоносним горизонтом, що приурочений до шару гравію та гальки четвертинних алювіальних ґрунтів (рис. 1, 2), – гравійно-гальковий водоносний горизонт. Водоносний горизонт підстилається шаром ГГШ, який вважається непроникними ґрунтами. На окремих локальних ділянках у покрівлі ГГШ виявлено карстові пустоти, які разом з алювіальними ґрунтами формують гравійно-гальковий водоносний горизонт. Соленосна товща нижнього неогену належить до водонепроникних ґрунтів. Але в цих шарах містяться води спорадичного поширеення, які приурочені до локальних карстових порожнин. Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, втрат води із хвостосховищ, шламонакопичувача, руслів річок Сівка та Кропивник на ділянках їх відведення у штучно створені канали.

Розвантаження відбувається в Домбровський кар'єр та в русла річок Лімниця, Чечва, Млинівка, Сівка та Кропивник.

За віком утворення, геоморфологічними умовами та фільтраційними властивостями єдиний гравійно-гальковий горизонт можна розділити на ділянки.

Ділянка заплави р. Лімниця, яка представлена сучасними четвертинними відкладами. Потужність цих відкладів становить 2–8 м. Вони представлені валунами, галькою та гравієм із піщаним заповнювачем чи без заповнювача. Глибина залягання підземних вод змінюється від 0,4 до 6,6 м. У роботі (Свиридовський, 1986) наведено коефіцієнти фільтрації руслових фацій ґрунтів між Лімницею та Млинівкою від 140 до 371 м/добу. Для руслових відкладів р. Лімниці, за даними одиночних відкачок води, середньозважений коефіцієнт фільтрації дорівнює 165 м/добу. Після обробки даних кущової відкачки води методом площадного простеження визначено коефіцієнти фільтрації від 187 до 197 м/добу.

У роботі (Звіт, 2018) визначено коефіцієнти фільтрації алювію у південно-східній частині м. Івано-Франківськ, на лівобережжі р. Бистриця Надвірнянська. Було проведено групову відкачку води тривалістю 15 діб із двох колодязів загальним дебітом 1080 м^3/добу при 8 спостережних свердловинах. Методами погодинного та комбінованого простеження визначені коефіцієнти фільтрації в межах від 15 до 247 м/добу. Як середнє значення прийнято Кф = 223 м/добу. Середній коефіцієнт рівнепровідності становить 9,1*10^4 м^2/добу.

Таким чином, для алювіальних відкладів русла р. Лімниця та р. Млинівка можливо приймати значення коефіцієнта фільтрації 190 м/добу як достовірно визначеного за допомогою дослідно-фільтраційних робіт.

Ділянка I та II надзаплавної тераси, яка поширюється між заплавою і уступом III надзаплавної тераси р. Лімниця у вигляді смуги завширшки 0,5–3,5 км (рис. 1). Водоносний горизонт поширений у гравійно-галькових відкладах із включеннями валунів. Заповнювачем служить пісок, супіски та суглинки. Глибина залягання підземних вод змінюється від 0,4 м (свердловина № 16) до 2,5 м (свердловина № 20).

Значення коефіцієнтів фільтрації для сучасної тераси коливається в межах 5–457 м/добу, за середнього 155 м/добу. Для першої тераси значення Кф коливається в межах 20–30 м/добу.

Ділянка III надзаплавної тераси поширена від свого уступу (див. рис. 1) на північ до меж ділянки робіт. Водоносний горизонт поширений у гравійно-галькових відкладах із включеннями валунів. Заповнювачем слугують пісок, супіски, суглинки та глини. Глибина залягання підземних вод змінюється від 0,9 (свердловина № 5) до 8,2 м (свердловина № 9).

На поверхні III надзаплавної тераси розташовані Домбровський кар'єр, Хвостосховища, шламонакопичувач, відстійники та Солевідвали № 1 та № 4.

Ґрунти гравійно-галькового водоносного горизонту на цій ділянці переважно представлені фракціями (Звіт, 2005): валуни 10–12 %; галька 35–60 %; гравію 13,5–52 %; пісок 35–60 %; пилуватих та глинистих часток 0,2–6,5 %. Згідно з нормативним документом (Звіт, 2005) такий ґрунт повинен називатись галечниковий із піщаним заповнювачем чи гравійний із піщаним заповнювачем, або піском гравіюватим, залежно від того, доля якої фракції переважає 50 %.

Фракція пилуватих і глинистих часток розподілена нерівномірно (Звіт, 2005). Тому коефіцієнти фільтрації цього шару лежить у межах від 1 м/добу (біля хвостосховища № 1) до 17,2 м/добу, при рекомендованому середньому 10 м/добу. У староріччях або прируслових ділянках цей параметр може досягати 67 м/добу. Але в цьому ж звіті на ст. 15 написано, що на ділянці рудника "Калуш", коефіцієнт фільтрації гравійно-галькового шару лише по окремих свердловинах досягає 1,2–2,3 м/добу, а загалом по площі дільниці – лише 0,5–0,7 м/добу. Такі низькі фільтраційні параметри гравійно-галькових відкладів пояснюються присутністю в них суглинистого заповнювача (50–70 %). Виняток становлять ділянки, розташовані біля р. Сівки, де коефіцієнти фільтрації досягають 2,8–3,8 м/добу.

Рис. 1. Схема розташування джерел забруднення, спостережних і водозабірних свердловин та ліній рівних напорів підземних вод станом на 24.08.2022 р.

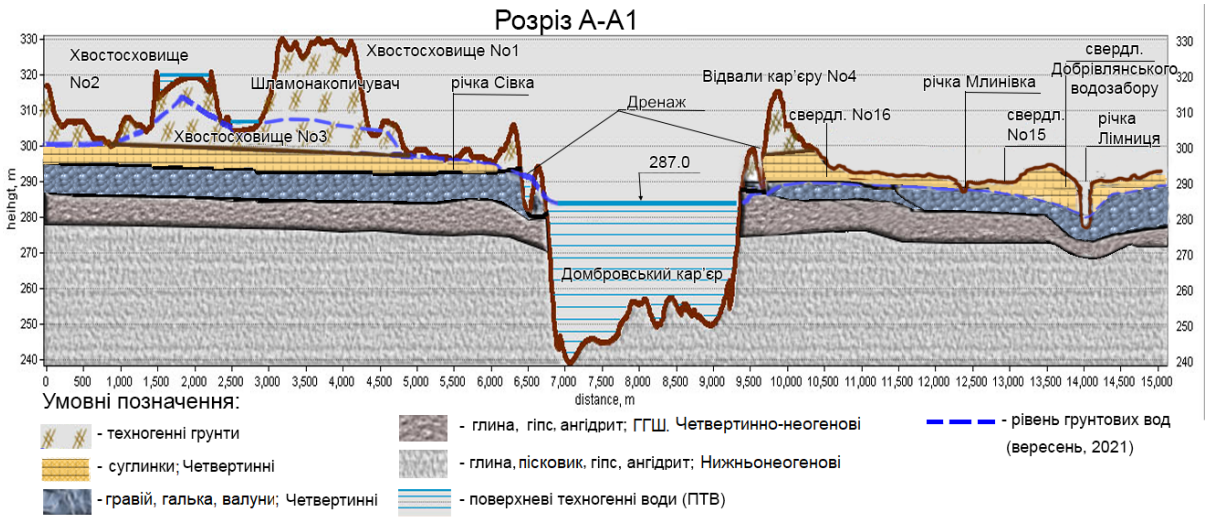


Рис. 2. Геолого-гідрогеологічний розріз Калуш-Голинського родовища калійних солей

На ділянці розміщення хвостосховища № 1 пористість шару, що описується, коливається від 8,5 до 13,2 % (Звіт, 2005). Внаслідок змін складу заповнювача коефіцієнти фільтрації цих ґрунтів характеризуються певним діапазоном коливань: від 0,9 до 6,8 м/добу. Потужність цього шару ґрунтів коливається в межах від 1–3 до 8–11 м, за середнього значення 10 м (Долін та ін, 2010).

На території рудника Ново-Голинь (Звіт, 2005) потужність гравійно-галькового горизонту коливається в межах від 3,2 до 17,4 м за середньої 8,36 м.

У роботі (Долін та ін, 2010) визначається коефіцієнт водопровідностіі за даними розрахунків балансу приток та водовідливу води з кільцевої дренажної траншеї Домбровського кар'єру за формулами Дарсі та Дюпюї. Ці величини дорівнюють 168 та 176 м^2/добу. За середньої потужності гравійно-галькового горизонту 10 м коефіцієнти фільтрації становлять 16,8 та 17,6 м/добу. Але, напевно, ці значення завищені, якщо врахувати, що надходження води в КДТ із зовнішньої її стінки відбувається не тільки по гравійно-гальковому горизонту, але й по карстових порожнинах у покрівлі ГГШ (Звіт, 2005). Тому ці величини проаналізовано та взято до уваги як попередні.

Отже, коефіцієнт фільтрації гравійно-галькового водоносного горизонту на III надзаплавній терасі р. Лімниці, за літературними даними, коливається в широких межах від 0,5 до 67 м/добу залежно від гранулометричного складу заповнювача галечників чи гравію.

Техногенні умови Домбровського кар'єру. Домбровський кар'єр був єдиним у світі об'єктом видобутку калій-магнієвої солі, де розробка вели відкритим способом. Домбровський кар'єр експлуатувався з 1967 по 2005 р.

За весь період експлуатації з Домбровського кар'єру видобуто 35,4 млн м^3 розкривних порід і 14,7 млн м^3 калійної руди, разом 50,1 млн м^3 гірничої маси.

Глибина розробки його сягає від 63 до 128 м. Розміри кар'єру сягають з півночі на південь близько 2000 м. Із заходу на схід орієнтовно – 1000 м. У 2008 р. з кар'єру припинили відкачувати воду, із цього часу рівень розсолів у ньому почав нерегульовано зростати. За рахунок надходження атмосферних опадів та розвантаження ґрунтових вод він самозатоплюється (рис. 2). Витоків води з кар'єру в неогенові ґрунти та ГГШ не відбувається. Ці ґрунти вважаються непроникними.

Об'єм розсолів у кар'єрі на початок 2020 р. становив 26,89 млн м^3. Мінералізація в придонній частині кар'єру складає 400 мг/дм^3, а у верхній – 20 мг/дм^3. Розсоли кар'єра при наповненні фільтруватимуться у водоносний горизонт (Kuzmenko, & Bagriy 2013; Hurska et al., 2015; Bagriy et al., 2017; Kuzmenko et al., 2018, Malkova et al., 2023).

По периметру Домбровського кар'єру створено КДТ для запобігання значним притокам підземних вод до кар'єру під час його експлуатації. У 2008 р. відкачку води з КДТ припинили. І з того часу КДТ являє собою ряд витягнутих водоймищ, розділених перемичками. Рівні води в цих водоймищах коливаються разом з рівнями підземних вод. Це дало змогу визначити ухил потоку підземних вод по берегах кар'єру при вимірах позначок води в ньому та в КДТ.

Домбровський кар'єр по праву можна вважати потенційним чи реальним джерелом засолення підземних вод.

Результати

Як було вказано вище, коефіцієнт фільтрації гравійно-галькового водоносного горизонту, що визначався раніше, має широкий інтервал значень, що негативно впливає на достовірність будь-яких прогнозів змін гідрогеологічних і гідрологічних умов, які пов'язані з водним режимом Домбровського кар'єру і його вплив на довкілля. Але визначення Кф території класичними методами (відкачками води із свердловин), в умовах різких змін фільтраційних властивостей ґрунтів не є ефективним засобом, тому що вимагають великої кількості дослідів, що на периметрі об'єкта дослідження в 5310 м (довжина КДТ) виконати неможливо з фінансових та технічних причин. Тому для визначення усередненого Кф для значної території в роботі було задіяно балансові методи інструментального визначення надходження води в кар'єр.

Для розрахунку Кф було взято до уваги, що кар'єром дренуються підземні води гравійно-галькового водоносного горизонту в повному обсязі. Якщо визначити об'єм води, що надійшла в кар'єр за певний час і визначити частку підземного стоку, тобто дебіт підземних вод, то Кф розраховується за відомим рівнянням Дарсі.

Метод розрахунку включав такі кроки:

1. За допомогою ГІС-технологій визначено позначки рівнів води, об'єми води та площі водного дзеркала на дати 21.06. 2018 р. і 26.08.2022 р. Вибір дат зумовлений наявністю космічних знімків прийнятної якості.

2. Різниця в об'ємах води в кар'єрі склала приплив води в кар'єр ($Q_{прип}$) за проміжок часу між вищевказаними датами.

3. Водний баланс кар'єру складається з надходження підземних вод та різниці між атмосферними опадами та випаровуванням ($Q_{опад-випар}$).

4. Надходження води за рахунок підземних вод ($Q_{під}$) визначається як різниця між $Q_{прип}$ та надходженням атмосферних опадів ($Q_{опад-випар}$).

Кф визначаємо з формули

$$Кф = Q_{під}/HBI, \quad (1)$$

де $Q_{під}$ – надходження підземних вод до кар'єру, H – потужність водоносного горизонту, 8 м, B – периметр водного дзеркала в кар'єрі, I – ухил поверхні грунтових вод.

На рис. 3 наведено параметри, визначені за допомогою ГІС-технологій.

Таблиця 1

Результати розрахунків параметрів

Дати визначення параметрів	Позначка рівнів води, м	Об'єм, м^3	Площа водного дзеркала, м^2	Між 21.06.2018 та 26.08.2022			
				Час, роки	Товщина шару води, що сформувалася	Збільшення об'єму води в кар'єрі, м^3	Середнє значення надходження води в кар'єр за рік, м^3
21.06.18	280,63	40892383	2046931	4,18	6,31	16077804	3846365
26.08.22	286,94	56970187	2574031				

Як наведено в табл. 1, позначка рівня води в кар'єрі за 21.06.2018 дорівнює 280,63 м. Це значення узгоджується з позначкою 280,24 м, яку інструментально визначено в травні 2018 р. (Звіт, 2018).

Середня річна норма атмосферних опадів сягає 0,778 м. Випаровування дорівнює 0,35 м (45 %) (Звіт, 2018). Стовп води, що формується в кар'єрі впродовж року за рахунок опадів, дорівнює 0,428 м. Отже, надходження води з опадами на площу кар'єру становить

$$Q_{опад-випар} = SH = 2574031 * 0.428 = 1101685 \text{ м}^3, \quad (2)$$

де S – площа водного дзеркала, H – стовп води, що формується в кар'єрі впродовж року за рахунок опадів.

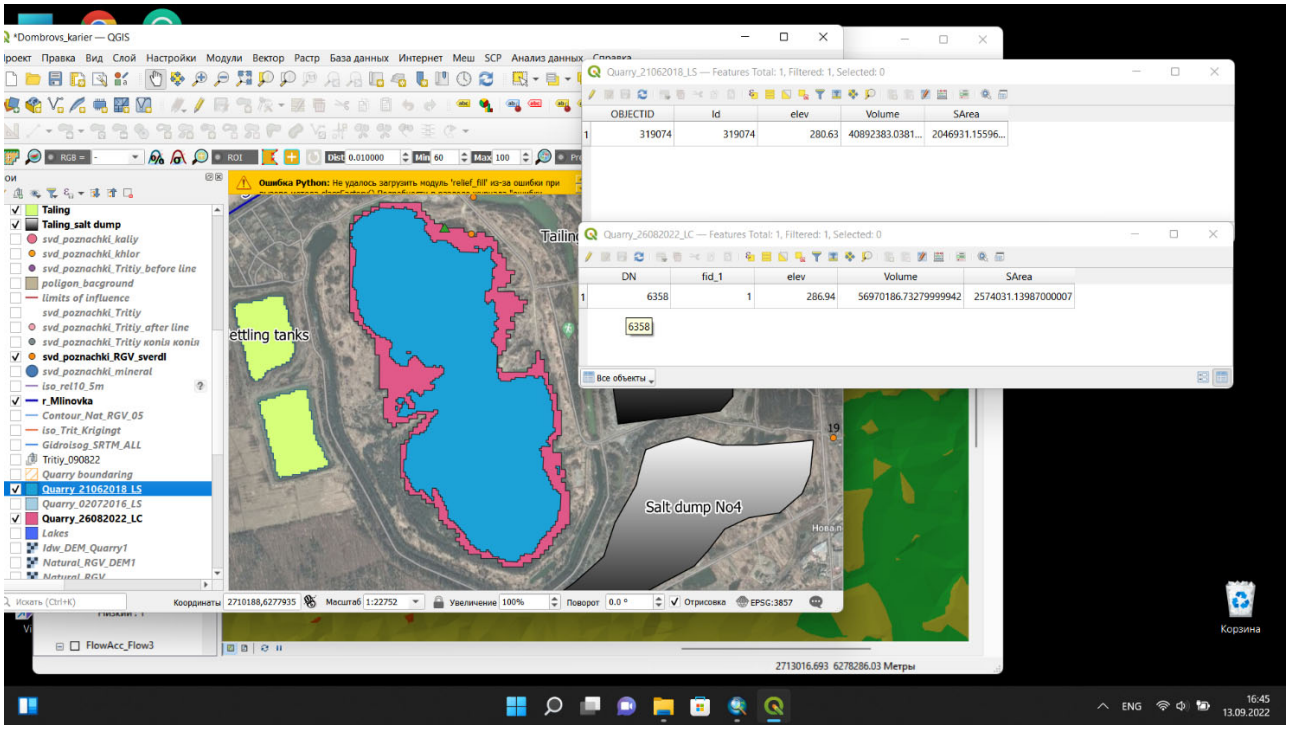


Рис. 3. Контури водного дзеркала в кар'єрі на 21.06. 2018 р. і 26.08.2022 р.

Згідно з вищенаведеною формулою об'єм води, що надходить з підземними водами впродовж року чи за добу, дорівнює

$$Q_{\text{під}} = Q_{\text{сер}} - Q_{\text{опад-випар}} = 3846365 - 1101685 = 2744679\ \text{м}^3/\text{рік} = 7520\ \text{м}^3/\text{добу}. \quad (3)$$

Периметр водного дзеркала дорівнює 4800 м. Середній ухил потоку підземних вод на період між 21.06.2018 та 26.08.2022 сягає 0,037. Потужність водоносного горизонту – 8 м (Захаров та ін, 1958).

Тоді, згідно з формулою (1)

$$К_ф = 7520/0.037 * 8 * 4800 = 5.3\ ^{\text{м}}/_{\text{добу}}. \quad (4)$$

Таким чином, вперше отримано оригінальним методом Кф гравійно-галькового водоносного горизонту I, II та III надзаплавних терас, що усереднює фільтраційні властивості ґрунтів на великий території і який можливо застосувати для виконання прогнозів засолення підземних вод.

Дискусі і висновки

У попередніх дослідженнях авторів детально проаналізовано та досліджено гідрогеохімічні умови гравійно-галькового водоносного горизонту та хімічний склад розсолів Домбровського кар'єру. Проте для побудови 3-вимірної математичної моделі об'єкта дослідження та прогнозування засолення єдиного питного водоносного горизонту для прилеглих населених пунктів, потрібно було визначити дійсний коефіцієнт фільтрації, який можна і надалі використовувати в розрахунках у подальших дослідженнях.

Проаналізовано всі наявні літературні джерела та проведено комплексний підхід щодо визначення коефіцієнта фільтрації (Кф) гравійно-галькового водоносного горизонту. Визначено, що, за літературними даними, коефіцієнт фільтрації коливається в межах від 0,5 до 67 м/добу залежно від гранулометричного складу заповнювача галечників чи гравію. Для визначення усередненого Кф для значної території використано балансові методи інструментального визначення надходження води в кар'єр. З використанням рівняння Дарсі визначено, що Кф становить 5,3 м/добу.

Отже, вперше отримано коефіцієнт фільтрації ґрунтів гравійно-галькового водоносного горизонту III надзаплавної тераси (ділянка розташування Домбровського кар'єру), що усереднює фільтраційні властивості ґрунтів на великий території і який можливо застосувати для виконання прогнозів засолення підземних вод. Результати досліджень використано для створення чисельної геофільтраційної моделі гідрогеологічних умов у межах Калуш-Голинського родовища. Результати калібровки моделі підтвердили правильність визначення коефіцієнта фільтрації (Sosonna et al, 2023).

Вперше запропоновано метод визначення коефіцієнта фільтрації ґрунтів водоносного горизонту з використанням ГІС-технологій визначення витрат потоку підземних вод, які повністю розвантажуються в кар'єр або в подібні водоймища.

Внесок авторів: Малькова Яна – збір та аналіз фондових і літературних джерел, розрахунки, написання тексту статті, Панасюк Микола – аналіз фондових і літературних джерел, розрахунки, формулювання висновків, Сосонна Наталія – розрахунки за допомогою ГІС-технологій, Багрій Сергій – аналіз даних, редагування тексту статті.

Список використаних джерел

Долін, В. В., Яковлєв, Є. О., Кузьменко, Е. Д., & Бараненко, Б. Т. (2010). Прогнозування екогідрогеохімічної ситуації при затопленні Домбровського кар'єру калійних руд. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 1, 74–87.

Захаров, В. Ф., Ковалева, И. Н., Еловская, М. В., Бобко, П. С., Бобко, П. С., Грудинин, Л. К., & Поленов, И. К. (1958). *Гидрогеологические и геотехнические свойства пород Домбровского участка Калушских месторождений калийных солей* (Т. I).

Звіт по темі "Ліквідація джерел забруднення підземних вод та рекультивація порушених земель території гірничо-технологічних об'єктів колишнього Калуського калійно-магнієвого виробництва (Домбровський кар'єр із зовнішніми відвалами розкривних порід № 1 та № 4, хвостосховище № 1, хвостосховище № 2, шламонакопичувач) м. Калуш, Калуський район, Івано-Франківська область" Договір № 14 від 10.05.2018 р. Етап 3. Обстежувальні роботи по об'єктах та територіях проектування. Звіт про науково-технічну роботу з обстеження та гідрохімічного опробування джерел забруднення 018.029.00.000-НТР1. Львів.

Звіт по темі "Проведення комплексних геологічних досліджень, спрямованих на визначення (прогнозування) змін природного стану

геологічного середовища в місцях розробки калійних родовищ з метою запобігання їх негативного впливу на життєдіяльність людей та стан господарських і промислових об'єктів. (1999 – 2005)". Звіт заключний. Державний науково-дослідний інститут галургії (НДІ "Галургія"). (2005).

Звіт по темі: "Геолого-економічна оцінка експлуатаційних запасів питних підземних вод ділянки Івано-Франківського родовища (колодязі №№2-11) Івано-Франківської області. (АТ "Українська залізниця") (підрахунок запасів станом на 30.10. 2019 р.)". Рівненська КГП ДП "Українська геологічна компанія". (2018–2019).

Кореневский, С. М., & Донченко, К. Б. (1963). Геология и условия формирования калийных месторождений Советского Предкарпатья. *Труды ВСЕГЕИ. Геология месторождений калийных солей*, 99, 152.

Малькова, Я., Яковлєв, Є., & Долін, В. (2020). Еколого-техногенні закономірності формування розсолів Домбровського кар'єру. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія Геологія*, 4(91). https://doi.org/10.17721/1728-2713.91.09

Свиридовский, А. П. (1986). *Отчет о результатах поисков и разведки пресных подземных вод для целей водоснабжения объектов МО СССР в 1985–1986 г.* Львов.

Malkova, Y., Kopylenko, O., Panasiuk, M., Sosonna, N., Bagriy, S., & Onyshchenko, I. (2022). Hydrogeochemical conditions of the Dombrovsky quarry as a source of groundwater pollution. *16th International Conference Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment*, 2022, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580186

Sosonna, N., Panasiuk, M., Malkova, Ya., Kovalenko, I., Bagriy, S., & Buzynnyi, M. (2023). Mathematical model of hydrogeological conditions and forecasts of groundwater salinization under the influence of Dombrovsky quarry of Kalush-Golinsky potassium salt deposit. *17th International conference Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment*, 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520185

References

Dolin, V. V., Yakovlev, E. O., Kuzmenko, E. D., & Baranenko, B. T. (2010). Forecasting the ecohydrogeochemical situation during the flooding of the Dombrovsky quarry of potash ores. *Environmental Safety and Balanced Resource Use*, 1, 74–87 [in Ukrainian].

Korenevsky, S. M., & Donchenko, K. B. (1963). Geology and formation conditions of potash deposits in the Soviet Precarpathians. *Proceedings of VSEGEI. Geology of potash salt deposits*, 99, 152 [in Russian].

Malkova, Y., Kopylenko, O., Panasiuk, M., Sosonna, N., Bagriy, S., & Onyshchenko, I. (2022). Hydrogeochemical conditions of the Dombrovsky quarry as a source of groundwater pollution. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2022, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580186

Malkova, Ya., Yakovlev, E., & Dolin, V. (2020). Ecological and technogenic regularities of the formation of brines in the Dombrovsky quarry. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology Series*, 4(91). https://doi.org/10.17721/1728-2713.91.09

Sosonna, N., Panasiuk, M., Malkova, Ya., Kovalenko, I., Bagriy, S., & Buzynnyi, M. (2023). Mathematical model of hydrogeological conditions and forecasts of groundwater salinization under the influence of the Dombrovsky quarry of the Kalush-Golinsky potassium salt deposit. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, *2023*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520185

Sviridovsky, A. P. (1986). *Report on the results of prospecting and exploration of fresh groundwater for the purposes of water supply of the Ministry of Defense of the USSR in 1985–1986*. Lviv, 46–54 [in Russian].

Zakharov, V. F., Kovaleva, I. N., Elovskaya, M. V., Bobko, P. S., Bobko, P. S., Grudinin, L. K., & Polenov, I. K. (1958). *Hydrogeological and geotechnical properties of rocks of the Dombrovsky section of the Kalush potassium salt deposits* (Vol. 1) [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 29.11.24
Прорецензовано / Revised: 28.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Yana MALKOVA[1], Junior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-6215-9901
e-mail: malkovayanakiev@gmail.com

Mykola PANASIUK[2], PhD (Techn.)
ORCID ID: 0000-0003-3607-344X
e-mail: nipanasyuk53@gmail.com

Natalia SOSONNA[2], Junior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9913-3457
e-mail: natalyasosonnaya@gmail.com

Sergiy BAGRIY[3], PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-1190-6222
e-mail: gbg2020@ukr.net

[1]State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of NAS of Ukraine"
[2]Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine
[3]Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

DETERMINATION OF THE FILTRATION COEFFICIENT OF THE GRAVEL AND PEBBLE ALLUVIAL AQUIFER AS ONE OF THE MAIN FILTRATION PARAMETERS OF THE HYDROGEOLOGICAL SYSTEM

B a c k g r o u n d . ***The threat of contamination of drinking water sources in the Kalush region is largely determined by the flooding of the Dombrovsky quarry and the possible leakage of highly mineralised brines into the gravel and pebble aquifer and river system from surface man-made reservoirs. Currently, the open pit serves as a drainage for groundwater, but the water level in the mine excavation is rising at a rate of approximately 1 m per year, which requires monitoring, research of the hydrogeological system in the area of drainage influence of the quarry and rapid management decisions to prevent an environmental emergency. The aim of the study was to propose a new method for determining the filtration coefficient (Ff), which would average the filtration properties of large massifs of soils of the gravel-pebble aquifer and take into account their heterogeneity.***

M e t h o d s . ***Balance methods of instrumental determination of water inflow to the quarry to determine the averaged filtration coefficient for a large area was used. Parameters for its calculation was found.***

R e s u l t s . ***All available literature and fund sources were analysed and summarised, and an integrated approach was applied to determine the filtration coefficient of the gravel and pebble aquifer. Using Darcy's equation, it is determined that the Ff is 5.3 m/day. A method for determining the filtration coefficient of aquifer soils using GIS technologies to determine the flow rate of groundwater that is completely discharged into a quarry or similar reservoirs is proposed. The results of the study were used to create a numerical geofiltration model and predict groundwater salinity.***

C o n c l u s i o n s . ***The urgent scientific issue of studying the hydrogeological system of the Kalush region and determining the filtration parameters of the gravel and pebble aquifer, which is the only source of drinking water for the city of Kalush and adjacent settlements, has been solved. The filtration coefficient of the gravel and pebble aquifer of the I, II and III floodplain terraces, which averages the filtration properties of soils over a large area and can be used to make predictions of groundwater salinity, was obtained.***

K e y w o r d s : ***gravel and pebble aquifer, Kalush-Golynsky deposit, filtration coefficient, Dombrovsky quarry.***

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.

ГЕОІНФОРМАТИКА

UDC 550.8
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.12

Vitaliy ZATSERKOVNYI[1], DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Victor VOROKH[1], PhD Student
ORCID ID: 0009-0005-0112-8422
e-mail: fainkucha@gmail.com

Olga HLOBA[1], Student
ORCID ID: 0009-0003-4923-3374
e-mail: olgagloba73@knu.ua

Tetiana MIRONCHUK[1], Assist. Prof.
ORCID ID: 0000 00025923 1028
e-mail: t_mironchuk@ukr.net

Iryna SIUIVA[1], PhD (Law), Assist. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5001-2750
e-mail: isiuiva.knu@gmail.com

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv (Kyiv, Ukraine)

AGROCHEMICAL ANALYSIS OF SOILS IN PRECISION FARMING TECHNOLOGIES: A CASE STUDY OF THE CHERNIHIV REGION

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

Background. *Precision agriculture aims to create a comprehensive decision-support system that enhances the efficiency and sustainability of agricultural practices. It is based on the principle that fields are not homogeneous and consist of various zones with distinct characteristics. Variability in soil, terrain, climatic conditions, and other factors results in different plant requirements across different field zones. Precision agriculture allows for consideration of this variability, enabling an individualized approach for each field section.*

A research presents a comprehensive approach to analyzing all key stages of agrochemical surveys, from the preparatory phase to laboratory analysis, the development of agrochemical maps, as well as the creation of fertilizer requirement maps and task maps for agricultural machinery. Particular attention is paid to the potential use of remote sensing data and geographic information technologies for processing and visualizing results.

Methods. *Soil sampling begins with determining the configuration and area of elementary zones. Several soil sampling strategies are considered, allowing each agricultural enterprise to choose the most suitable one based on its goals and specific field conditions.*

Agrochemical soil properties can vary significantly even within small field areas, necessitating a meticulous approach to sampling for analysis.

Results. *Developed agrochemical maps serve as additional visual materials that modern laboratories provide along with agrochemical soil reports. These maps, available in both paper and digital formats, illustrate various levels of humus content, nutrient levels in the soil, and soil solution pH.*

Conclusions. *Agrochemical soil analysis provides essential information for optimizing the processes of differential fertilizer and seed applications. Based on the data obtained about soil type, macro- and micronutrient content, organic matter levels, moisture levels, and other key indicators, the nutrient requirements of elementary zones can be accurately determined. This enables the development of effective agronomic strategies tailored to specific field conditions.*

Keywords: *precision agriculture, agrochemical soil analysis, soil sampling scheme, geographic information technologies, agricultural automation, soil mapping.*

Background

***Relevance of the research topic*:** The United Nations Commission on Population and Development reported that the Earth's population reached 7.7 billion in 2019 and continues to grow. According to projections, by 2050 it will have reached 9.7 billion, and by the end of the century, it will have increased to approximately 11 billion people (Commission on Population and Development, 2019). In this regard, there is a threat that, given the existing natural resources, arable land, and agricultural technologies, the production of the required amount of food for the world's population may prove insufficient. Increasing the amount of land available for food production is not feasible, as deforestation or wetland drainage poses a risk of ecological catastrophe. Moreover, the productivity of agricultural crops is approaching biological limits (Morgun et al., 2010). The problem is further exacerbated by the uneven development of agriculture across countries and continents, the irrational use of natural resources, and the continuous increase in the cost of seeds, mineral fertilizers, plant protection products, machinery, and other agricultural production resources.

The world faces a challenge of how to feed itself amid the growing global population and the imbalance between food supply and demand. To meet this challenge, food production must increase by at least 70 %. Thus, there is an urgent need to improve the efficiency of agricultural production, particularly in plant cultivation. This can be achieved by increasing yields through the implementation of advanced resource-saving technologies, which will enable more efficient use of arable land, natural material, and economic resources, while also reducing environmental pressure on the natural environment (NPS). One such technology that can ensure high profitability in agriculture is the precision farming system (Tsyhanenko, 2015).

Additionally, Ukraine's agriculture, like that of many other countries, faces challenges caused by climate change, including more frequent droughts, heavy rains, and other extreme weather events that negatively impact agricultural productivity, especially in areas of risky farming, where traditional agricultural methods are becoming less effective. Given that most of Ukraine's cultivated land is already in this

© Zatserkovnyi Vitaliy , Vorokh Victor, Hloba Olga, Mironchuk Tetiana, Siuiva Iryna, 2025

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

zone, and considering the damages caused by the Russian aggression, the situation is becoming even more complicated.

The solution to this situation lies in the use of innovative land cultivation methods and optimization of available resources, primarily through the application of precision farming technologies.

Precision farming aims to create a comprehensive decision-making support system that enhances the efficiency and sustainability of agricultural practices. It is based on the principle that fields are not uniform and consist of different areas with varying characteristics. Variability in soils, topography, climate conditions, and other factors results in different plant needs across different parts of a field. Precision farming allows for the consideration of this variability and the application of an individualized approach to each area. This technology promotes environmental sustainability by ensuring the rational use of resources, reducing soil and groundwater pollution, and decreasing the use of fertilizers and pesticides through precise control of every stage of agricultural production. A 2021 study found that farmers using precision technologies achieved a 4 % increase in yield and a 7 % improvement in fertilizer application efficiency. Additionally, these practices led to a 9 % reduction in herbicide and pesticide use, contributing to the sustainable development of agriculture (Association of Equipment Manufacturers, 2021). A study by the U.S. Government Accountability Office (GAO) revealed that precision farming technologies can improve resource management through the precise application of resources such as water, fertilizers, and micronutrients, leading to increased yields and reduced environmental impact (U.S. Government Accountability Office, 2024).

One of the fundamental tools of precision agriculture is agrochemical soil analysis, which requires priority study for further differential management of agricultural land, increasing crop yields, efficient resource utilization, and ensuring the environmental sustainability of natural ecosystems.

Previous studies in the field of precision agriculture and soil sampling methodology have significantly influenced the evolution of modern nutrient management strategies in agricultural systems. A literature review conducted by the authors highlights the transformation of sampling technologies and their integration into practical farming applications. Notable contributions have been made by researchers such as Qin Zhang, Dennis Ess, Margaret Oliver, Thomas Bishop, Ben Marchant, D. Kent Shannon, David E. Clay, Newell R. Kitchen, and John F. Shanahan. It is also important to recognize the significant contributions of Ukrainian scientists, including L. Moldovan, L. Novakivsky, B. Parkhaver, P. Sabliuk, and A. Tretiak. Challenges related to the implementation of precision agriculture technologies are explored in the works of L. Aniskevych, D. Voitiuk, V. Haram, M. Makarenko, O. Tkachenko, and M. Tsyhanenko.

The goal of this paper is to analyse, summarize, and evaluate the application of agrochemical soil analysis as a foundation for solving precision agriculture tasks, as well as to explore the potential of geoinformation technologies as a platform for visualizing spatial agricultural challenges and facilitating effective decision-making.

Presentation of Main Material. The technology of agrochemical soil analysis consists of three main stages: sample collection, laboratory (desk) analysis, and the issuance of recommendations adapted to the realities of Ukraine.

The data processing stage is crucial in the research process, as it involves the analysis, interpretation, and integration of laboratory (desk) results into field management decisions. The study includes spatial pattern analysis, the creation of cartographic models, and the preparation of agronomic recommendations for optimizing fertilizers use and increasing crop yields. The effectiveness of these solutions depends on the quality of this stage. Therefore, the preparatory stage (document analysis and selection of the sampling scheme) and the field stage–determining sampling routes and collecting soil samples–are of primary importance.

Methods

The research was conducted by the authors on a field covering an area of 309.6 hectares, located near the village of Berizka in the Varvynska Territorial Community of the Pryluky district, Chernihiv region, based on data from the agricultural company Kernel (Fig. 1). The soils of the field are predominantly represented by typical low humus chernozems and degraded light loamy chernozems, which have high agricultural potential but require special attention to maintaining their fertility and structure.

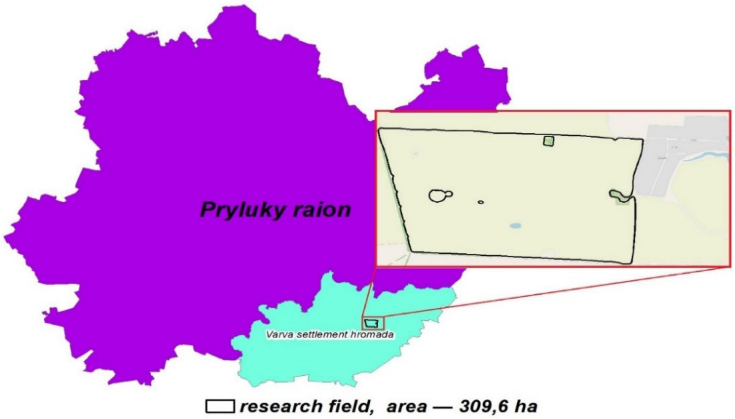


Fig. 1. Location of the Studied Field with an Area of 309.6 hectares

The relief is heterogeneous, with an elevation difference of 20 meters and gentle slopes (gradient up to 4°). Combining a digital elevation model (Fig. 2(a)) with a topographic *wetness index (Fig. 2(b)), calculated as ln (a/tan β), where "a" is the local upslope area per unit contour length and "tan β"* is the local slope angle (Beven, & Kirkby, 1979), allows for predicting the risks of water erosion within the field. Under such conditions, runoff flows are formed, which can lead to the formation of gullies or soil washout.

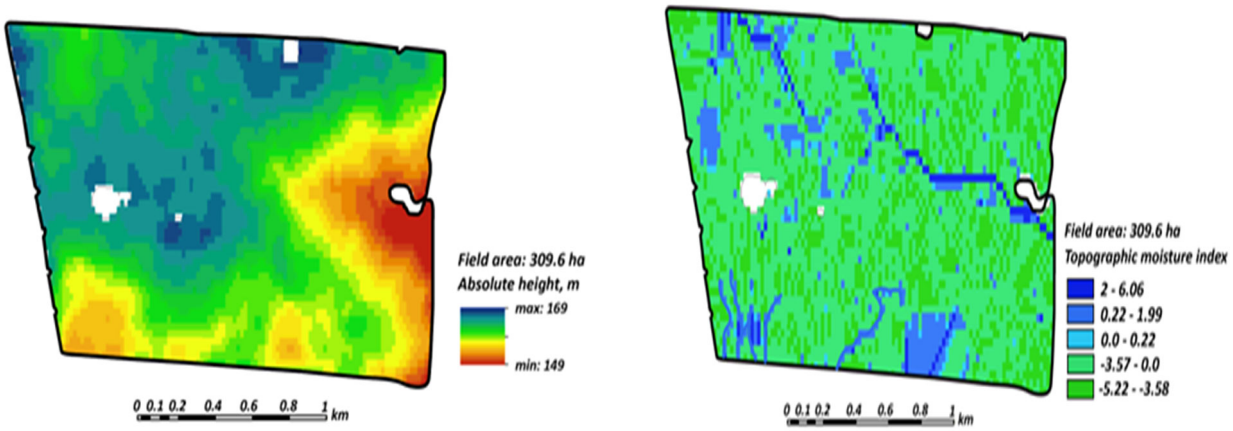


Fig. 2. Digital Elevation Model (a) and Topographic Wetness Index Map (b), of the Studied Field with an Area of 309.6 ha

Soil sampling begins with determining the configuration and area of elementary plots. There exist several soil sampling strategies, with each agricultural enterprise to select the most suitable one based on the specific field's goals and characteristics. When creating a zonal sampling scheme (Fig. 3), historical data (such as soil agroproduction group maps and yield maps for at least the past three years, topographic maps), data from soil conductivity monitoring devices, meteorological information, and remote crop monitoring data (various vegetation indices, including NDVI, EVI, and SAVI) are used. Each of these data types can be applied individually or in combination, with weighted influence coefficients (Brovarets, 2018).

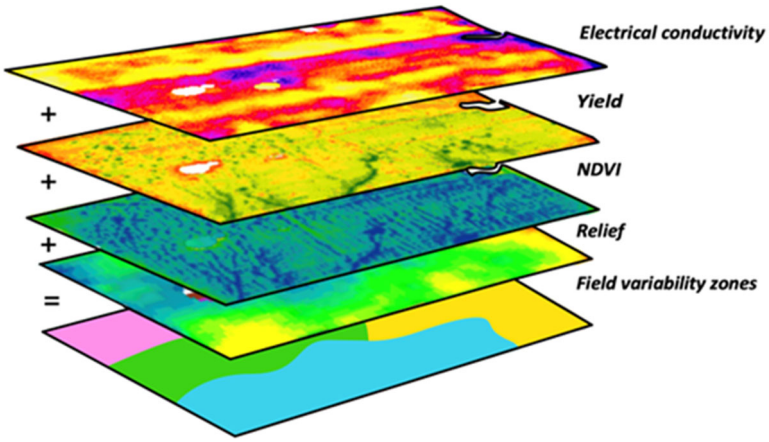


Fig. 3. Field Zoning Based on Variability Parameters of Soil Conditions and Crops

Soil sampling is conducted using a mobile automated system consisting of a navigation system, a field computer, an automatic soil sampler, and a high-clearance vehicle equipped with this technology. Once the equipment is connected, the operator traverses the field along a given sampling route. The location of each borehole is recorded using a navigation receiver with coordinating referencing. Automated soil samplers ensure a standardized sampling depth, which is a critical requirement for obtaining reliable agrochemical analysis results. The high level of automation and integrated control systems minimize the influence of human error reducing the risk of inaccuracies during this initial and critically important stage of research. Due to the equipment's high operational speed, each sample can be collected in 10–15 seconds, even on dense soil types, significantly reducing the time required for fieldwork.

In modern precision agriculture, automated soil samplers mounted on tractors and vehicles are becoming an essential tool for speeding up the process and enhancing the accuracy of agrochemical analysis (Fig 4).

Yield maps are created based on data collected by optical or mechanical sensors mounted on grain harvesters. These systems account for the time delay required to move the harvested mass from the header to the grain elevator. The measurement error of modern sensors typically does not exceed 5 %. Yield is calculated with reference to the harvester's position in the field using GPS equipment (Shevchenko, 2019).

The yield map of the studied 309.6 ha corn field for 2020 indicates uneven soil erosion, leading to reduced yields in eroded areas and increased yields in accumulation zones. The average grain yield per hectare of the field is 8.14 t/ha (Fig. 5).

In the absence of sufficient historical data, geomorphological features of the area, slope gradient information, soil color, and texture from satellite or aerial imagery can be used to delineate zones.

The agrochemical properties of soil can vary significantly even within small field areas requiring a meticulous approach to sample collection for analysis. The sampling scheme and grid density directly affect the accuracy of nutrient content assessments. Tab. 1 presents a comparison of soil sampling approaches developed by the authors.

Fig. 4. Automatic Soil Sampler AgriSoilSample by the Ukrainian Company Agrilab
(Soil Sampler AgriSoilSample, 2024)

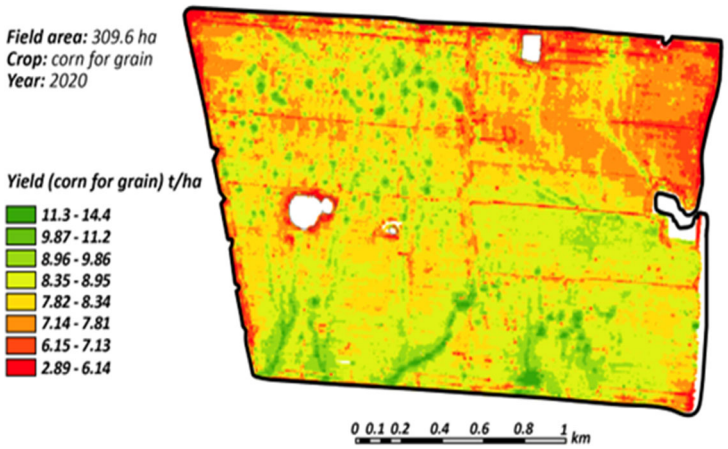


Fig. 5. Yield Map of the Field Studied as of 2020

Table 1

Comparison of Approaches to Soil Sampling

Sampling Scheme	Methods Of Sampling	Advantages	Disadvantages
Grid Scheme (sampling by cells)	sampling from various points within cells using transects	- need for fewer soil samples compared to point-based methods - no restrictions on the size of the elementary plot (cell) - requiring no detailed information about the field - low cost	- less accurate reflection of variability within the field, as it smooths out minor variations within cells
Grid Scheme (sampling by points)	sampling from the center of each cell or at grid line intersections	- providing detailed information on soil variability by adjusting grid density - ensuring accurate results for complex zones - requiring no detailed information about the field	-need for many samples and a dense grid - high cost - for cartographic development, additional GIS analysis (e.g. interpolation) is required
Zonal Scheme	taking several soil samples within boundaries of each defined zone	- covering areas with higher variability using fewer samples - being less time-consuming and labor-intensive due to fewer samples	- need for data on field productivity and yield from previous years - spatial information must be available to define zones - requiring professional knowledge of agronomy and GIS for defining zones

In the grid-sampling scheme, the elementary plots are land parcels of equal size, typically rectangular or square in shape. The maximum area of these plots depends on the client's preferences for agrochemical field surveys, but it should not exceed the allowable areas determined by natural zones and types of agricultural land. For example, the maximum area of an elementary plot on non-irrigated lands of the forest-steppe zone is 15 hectares, while on irrigated lands of Transcarpathia it is 2 hectares (Yatsuk, & Balyuk, 2019).

Soil sampling can also be performed at the intersections of grid lines. To create a composite sample, 8–15 samples from an area located approximately 5–10 meters from the intersection point are randomly combined (Singh, Caughman, & Park, 2020). The results are visualized using interpolation, a mathematical method used for spatial prediction of parameter values at unknown points based on data obtained at known coordinates. The accuracy of the map created through interpolation depends on several critical factors. Firstly, the sampling grid density plays a key role: fewer sampling points increase the risk of predicting errors, particularly in the fields with high variability. Secondly, a heterogeneous relief and the geographical features of the field can complicate predictions. Additionally, the choice of interpolation algorithm (for example: kriging or inverse distance weighting) significantly impacts the accuracy of the raster surface.

The grid strategy is further divided into two subtypes: cell sampling and point sampling (Austin, Gatiboni, & Havlin, 2020). The cell approach involves collecting several dozen soil samples from various points within each cell following a specific route. For elongated and narrow elementary plots, sampling routes for composite samples are laid along the plot or in a zigzag pattern at set intervals. If the plot is square-shaped, the most optimal sampling pattern is a checkerboard layout. On very large fields, point samples are placed diagonally (Fig. 6). On slopes, sampling is conducted in the upper, middle, and lower parts of the field.

The point approach involves selecting a single point for soil sampling from each elementary plot, typically at its center (Fig. 7).

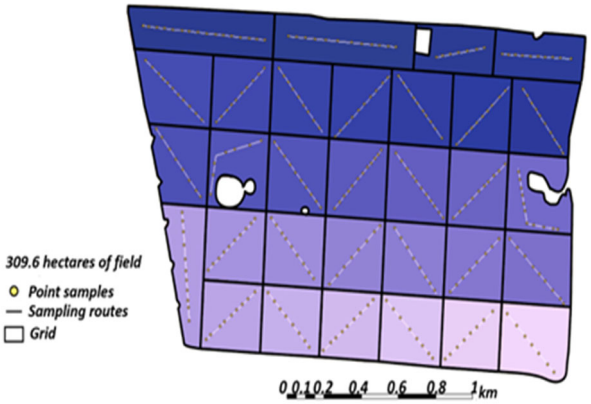


Fig. 6. Grid-based Soil Sampling Scheme with Diagonal Movement at a Grid Density of 10 ha

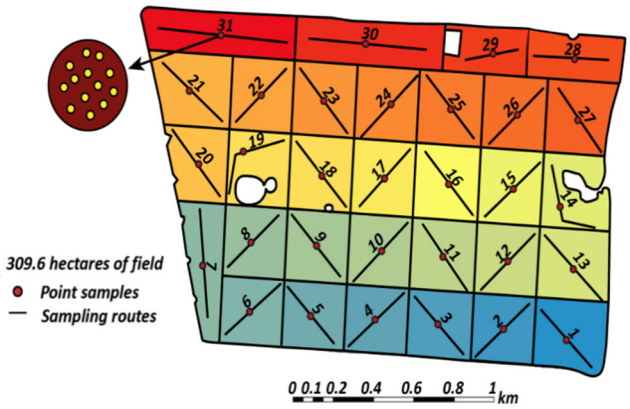


Fig. 7. Point-based Soil Sampling Scheme at a Grid Density of 10 ha

Reducing the size of the soil sampling grid increases the accuracy of determining the agrochemical variability of the field. However, this entails a considerable rise in financial costs. Specifically, as of 2024, the average cost of analysing a single soil sample in Ukrainian agricultural laboratories ranges from 1,500 to 2,500 UAH (Where to Conduct Soil Analysis..., 2024).

Since ensuring data comparability requires soil sampling to be conducted at the same geographic coordinates each time, it is essential to incorporate historical and statistical field data at the initial stage. This includes previous agrochemical analysis results, terrain features, and soil condition variability. Based on this information, an optimal sampling scheme and grid density should be established to balance the accuracy of the collected data with the cost-effectiveness of the survey.

Results

Table 2 and Fig. 8 present the results of the laboratory stage of agrochemical analysis of the 309.6-hectare cultivated field for the year 2020 provided by the agricultural company Kernel. The values of the parameters were determined using methodologies selected by KernelLab. The buffer pH soil determination method was developed by Frank J. Sikora, an associate professor from the university of Kentucky (Sikora, 2005); and the method for determining potassium, calcium, magnesium, and sodium content was devised by D. Warncke and J. R. Brown (Warncke, & Brown, 1988). Additionally, international standards localized for Ukraine, such as DSTU ISO 10390 (DSTU ISO 10390: 2019), DSTU ISO 14870 (DSTU ISO 14870: 2005), DSTU 4289:2004 (DSTU 4289: 2004, 2004), DSTU 4115-2002 by the Chirikov method (DSTU 4115-2002, 2002), DSTU 3866-99 (DSTU 3866-99, 1999) were applied. The sampling grid density under the cell-based sampling scheme was 10 hectares, with composite sample values averaged for the studied field.

The interpretation of the results obtained is a key stage in agrochemical analysis, as the effectiveness of subsequent agronomic decisions depends on the accurate understanding of these data. Indicator values should be presented in a convenient and comprehensible format, which allows for a clear assessment of soil conditions and the development of recommendations.

Agrochemical maps are additional visual materials that modern laboratories provide along with the agrochemical soil report. These maps, available in both paper and electronic formats, illustrate different levels of humus content, nutrient availability in the soil, and soil solution reaction (Fig. 9). The classification of soils based on agrochemical indicators involves color gradations representing the content of mobile nutrient compounds in milligrams per kilogram of soil, humus percentage, and acidity or alkalinity levels based on pH values. For instance, the agrochemical analysis of the studied field in 2020 showed that the soil had a slightly acidic to near-neutral reaction, a medium to low organic matter content, and a predominantly sufficient level of mobile phosphorus and potassium, with some areas exhibiting elevated values of these indicators.

Agrochemical soil analysis provides essential information for optimizing the process of variable-rate fertilizer and seed application. Based on the obtained data regarding soil type, macro- and micronutrient content, organic matter levels, moisture status, and other key parameters, it is possible to precisely determine the nutrient needs of specific field sections. This enables the

development of an effective agronomic strategy tailored to the field's specific conditions. The maps in Fig. 10 indicate a significant demand for phosphorus and potassium fertilizers in the studied field as of 2020. Most areas required applications of 60–85 kg/ha of P_2O_5 and K_2O, with localized zones showing lower or minimal fertilization needs.

Table 2

Agrochemical Survey of the Investigated Field

Indicator	Method	Min Value	Max Value	Average Value	Standard Deviation
pH (KCl), unit	DSTU ISO 10390:2019, IDT	5.1	6.6	5.7	0.28
buffer pH, unit	Sikora method (Sikora,2005)	6.5	7.1	6.8	0.15
organic matter, %	DSTU 4289:2004	3.2	4.2	3.7	0.22
mobile Phosphorus (P_2O_5), mg/kg	DSTU 4115-2002 (by Chirikov's method)	114.0	215.7	142.9	17.65
exchangeable potassium (K), mg/kg	Chirikov's method	94.5	179.3	121.2	17.66
exchangeable calcium (Ca), mg/kg	*selected testing methods ("Recommended chemical soil test procedures for the Central North Region. Chapter 7: Potassium and other Basic Cations" by D. Warncke and J.R. Brown; "Midwest Laboratories Calculating Cation Exchange Capacity and the Percent Base Saturation")* *At- pH=7.0* *(Ward, R. C. n.d.),* *(Midwest Laboratories. n.d.)*	2603.6	3668.9	2984.3	178,54
exchangeable magnesium (Mg), mg/kg		225.3	286.9	263.8	10.49
exchangeable sodium (Na), mg/kg		14.8	33.5	20.1	4.21
copper (Cu), mg/kg	DSTU ISO 14870:2005	0.55	0.74	0.62	0.06
zinc (Zn), mg/kg	DSTU ISO 14870:2005	0.47	2.69	0.89	0.72
manganese (Mn), mg/kg	DSTU ISO 14870:2005	25.0	48.8	34.4	7.17
iron (Fe), mg/kg	DSTU ISO 14870:2005	33.0	75.1	53.8	12.92

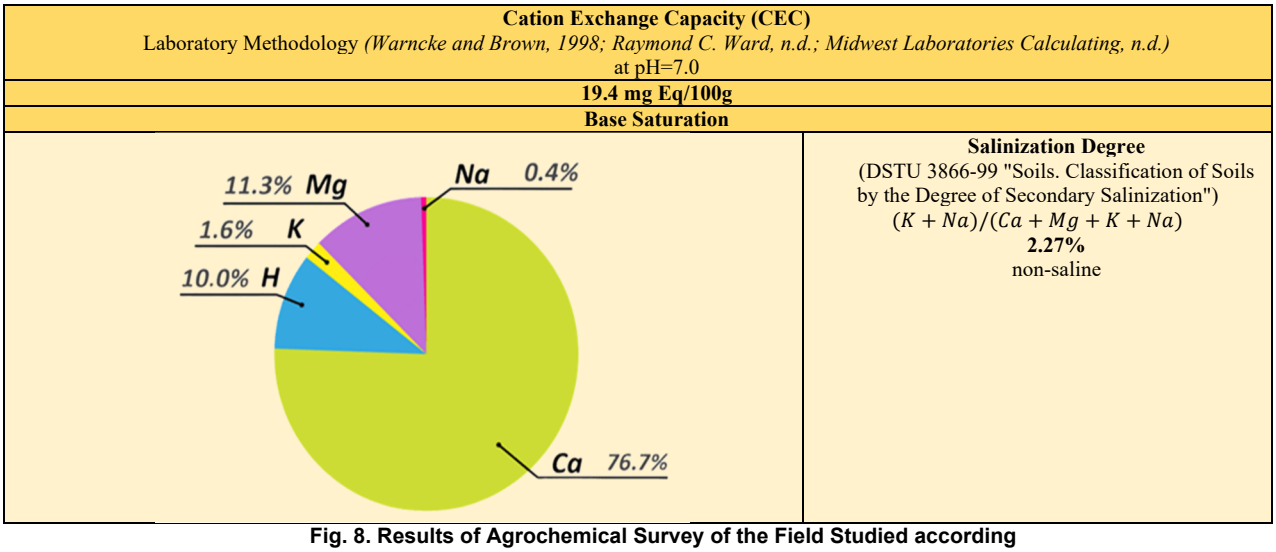


Fig. 8. Results of Agrochemical Survey of the Field Studied according to Kernel Agro company Data

The amount of fertilizer application is determined based on the planned crop rotation, target yield, and agrochemical condition of the soil. This process is carried out by creating prescription maps for agricultural machinery, including spreaders, sprayers, or fertilizer applicators. A prescription map is a cartographic representation that contains information about variable fertilizer application rates or seeding rates. These data are integrated with controllers installed on agricultural equipment and used in conjunction with navigation systems to precisely regulate the application rate in different field zones. The application process operates offline, adapting to the specific characteristics of each area (Zatserkovnyi, & Vorokh, 2024). Based on the quantitative soil indicators of the studied field in 2020, the prescription maps (Fig. 11) illustrate a differentiated approach, prescribing varying amounts of complex (NPK), nitrogen-phosphorus, and potassium fertilizers per hectare at different stages of field treatment in the following planting season.

A promising direction in modern agricultural production is the development of sensors for real-time determination of soil physicochemical properties (Sokolik, 2024). The most widely used are electrical and electromagnetic sensors, which allow for the assessment of soil conductivity revealing heterogeneity in texture and other properties. At the same time, optical sensors are being developed to implement remote monitoring algorithms, and electrochemical devices can evaluate pH and ion content in the soil solution. Mechanical, acoustic, and pneumatic sensors are used to assess the physical state of the soil, particularly its compaction. Although the commercial application of many of these devices is still in its early stages, their potential to reduce the costs of agrochemical analysis and improve the accuracy of differentiated fertilizer applications is significant.

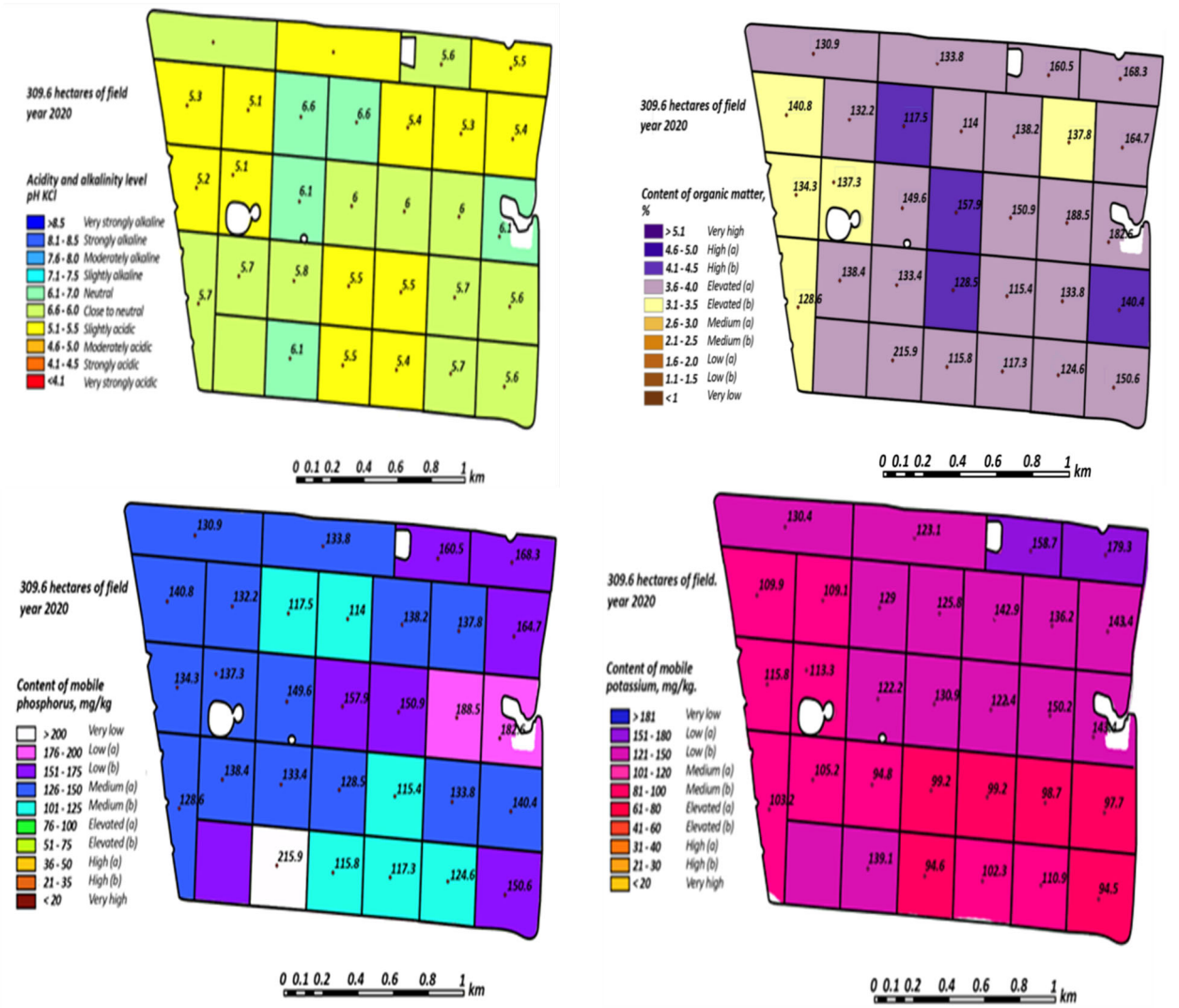
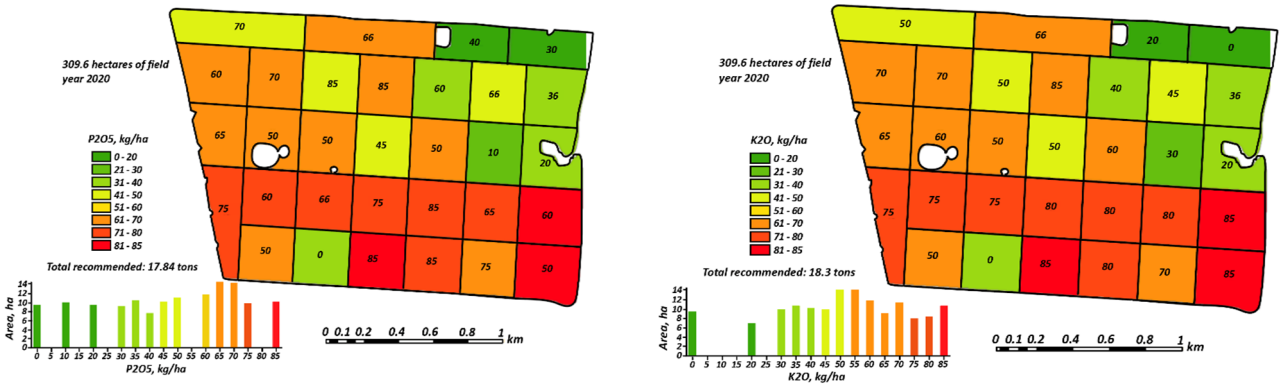


Fig. 9. Cartograms of Soil Acidity and Selected Indicators of the Studied Field



a) b)

Fig. 10. Cartographic Assessment of Elementary Plots' Need for Available Phosphorus (a) and Potassium (b) Based on Agrochemical Analysis

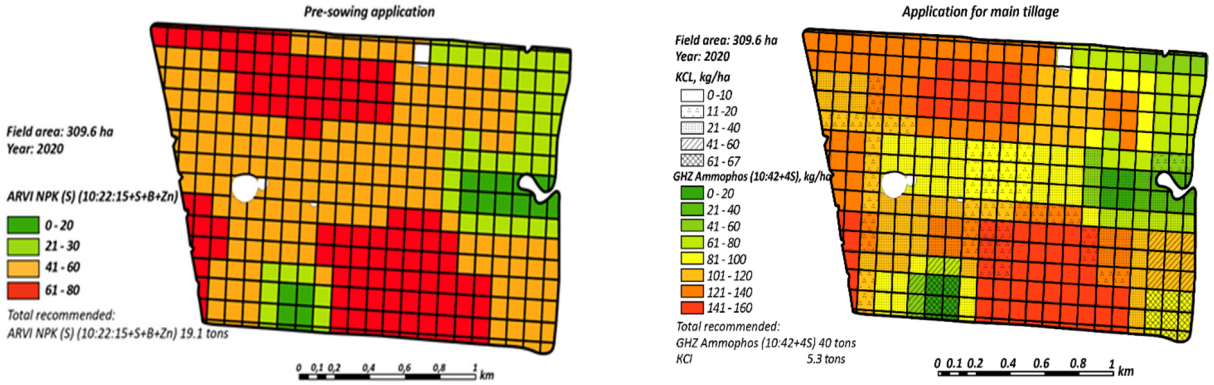


Fig. 11. Task Maps for Agricultural Machinery for Applying Compound Fertilizers to the Field Studied at Different Cultivation Stages

Discussion and conclusions

Agrochemical soil analysis and the implementation of precision farming technologies are essential tools for increasing the efficiency and environmental sustainability of agricultural production. The presented research highlights the importance of a comprehensive approach to soil analysis, which includes careful sample collection, laboratory testing, spatial data interpretation, and the development of recommendations to optimize agronomic practices. In particular, the agrochemical analysis of soil pH in the studied field, covering an area of 309.6 ha in 2020, ranged from 5.1 to 6.6, with an average value of 5.7, indicating a slightly acidic reaction. The average organic matter content was 3.7 %, while the levels of mobile phosphorus and exchangeable potassium were 142.9 mg/kg and 121.2 mg/kg, respectively. Considering the results of the agrochemical soil survey, the terrain, and the average corn yield in the studied field in 2020, which amounted to 8.14 t/ha, with a maximum yield of 14.4 t/ha in certain areas, soil nutrient requirements for the 2021 planting season were determined. The recommendations included applying up to 40 tons of ammonium phosphate and 5.3 tons of potassium fertilizer during primary field treatment, as well as 19.1 tons of NPK(S) during pre-sowing treatment. Variable-rate fertilizer application was carried out according to the developed prescription maps.

Modern methods enable the consideration of diverse soil properties and climatic conditions, ensuring an individualized approach to managing each field section. Specifically, the use of agrochemical maps, variable-rate fertilization systems, and the development of real-time sensors provide new opportunities for more precise and cost-effective farming.

The implementation of geoinformation technologies and remote sensing facilitates the efficient visualization of soil analysis results, the creation of prescription maps for agricultural machinery, and informed decision-making. This approach minimizes resource losses, reduces environmental impact, and enhances crop yields.

Despite the promising prospects, challenges related to the high cost of technology and agrochemical soil analysis must be considered. Future research should focus on expanding the potential of remote sensing data, land cover analysis methods, and real-time soil property detection sensors.

Authors' contributions: Vitalii Zatserkovnyi – conceptualization, methodology, writing; Viktor Vorokh – remote sensing data processing, methodology, search for optimal solutions to the problem; Olga Hloba – geoinformation analysis, data processing, writing; Tetiana Mironchuk – data analysis and processing, writing (review and editing); Iryna Siuiva– data analysis and processing.

References

Association of Equipment Manufacturers. (2021, February 1). *U.S. Precision Agriculture Study Unveiled by AEM, Ag Organizations*. https://newsroom.aem.org

Austin, R., Gatiboni, L., & Havlin, J. (2020). Soil Sampling Strategies for Site-specific Field Management. *NC State Extension Publications*. https://content.ces.ncsu.edu/

Beven, K. J., & Kirkb, M. J. (1979). A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin,* 24(1), 43–69. https://doi.org/10.1080/02626667909491834

Brovarets, O. O. (2018). Probabilistic-Statistical Methods for Determining the Magnitude of Variability Zones of Agrobiological Parameters of Agricultural Lands to Ensure Proper Quality of Technological Operations in Crop Production Based on Local Operational Monitoring Data. *Bulletin of Khmelnytskyi National University*, 5, 272–283 [in Ukrainian]. [Броварець О. О. (2018). Ймовірнісно-статистичні методи визначення величини зон варіабельності агробіологічних параметрів сільськогосподарських угідь для забезпечення належної якості виконання технологічних операцій у рослинництві на основі даних локального оперативного моніторингу. *Вісник Хмельницького національного університету,* 5, 272–283].

Commission on Population and Development. (2019). *Review and Appraisal of the Programme of Action of the International Conference on Population and Development and its Contribution to the Follow-up and Review of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations. Retrieved from *Gruntovidbirnyk AgriSoilSampler*. (n.d.). AgriLab. https://agrilab.ua/ services/ systemy-raven/ [in Ukrainian]. ["Грунтовідбірник AgriSoilSampler" (н.д.). *AgriLab*. https://agrilab.ua/services/systemy-raven/].

https://www.un.org/en/development/desa/population/pdf/commission/2019/country/AgendaItem3/poland_en.pdf

Midwest Laboratories. (n.d.). *Calculating Cation Exchange Capacity and the Percent Base Saturation*. Retrieved from https://www.researchgate.net/

Morgun, V. V., Shvartau ,V. V., & Kyryzii, D. A. (2010). Physiological Bases of Forming High Productivity of Cereal Crops. *Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants*, 42(5), 371–392 [in Ukrainian]. [Моргун В. В., Швартау В. В., & Киризий Д. А. (2010). Фізіологічні основи формування високої продуктивності зернових злаків. *Фізіологія і біохімія культурних рослин*, 42(5), 371–392].

Shevchenko, K. (2019, April 2). School of Agronomists: What you Need to Know about Yield Maps. *Agravery*. Retrieved from https://agravery.com/uk/posts/show/skola-agronomiv-so-treba-znati-pro-karti-vrozajnosti [in Ukrainian]. [Шевченко, К. (2019, 2 квітня). *"Школа агрономів: що треба знати про карти врожайності" Agravery*. Отримано з] https://agravery.com/uk/posts/show/skola-agronomiv-so-treba-znati-pro-karti-vrozajnosti].

Sikora, F. J. (2005). Replacing SMP Buffer with Sikora Buffer for Determining Lime Requirement of Soil. *Oklahoma State University Stillwater*. Retrieved from https://www.naptprogram.org/files/napt/publications/method-papers/2005-replacing-smp-buffer-with-sikora-buffer-for-determining-lime-requirement-of-soil.pdf

Singh, B., Caughman, W., & Park, D. (2020). Precision Agriculture-based Soil Sampling Strategies. *Land-Grant Press by Clemson Extension*. Retrieved from https://lgpress.clemson.edu/

Sokolik, S. P. (2024). Analysis of the Development of Modern Mobile Systems for Monitoring Soil Characteristics. *Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes*, 2(56), 86–89 [in Ukrainian]. [Соколік, С. П. (2024). Аналіз розвитку сучасних мобільних систем моніторингу характеристик ґрунту. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів*, 2(56), 86–89].

State Enterprise "Ukrainian Research and Training Center for Standardization, Certification and Quality". (1999). *DSTU 3866-99. Soils. Classification of soils by degree of secondary salinization*. O.N. Sokolovsky Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine [in Ukrainian]. [Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості". (1999). ДСТУ 3866-99. Ґрунти. Класифікація ґрунтів за ступенем вторинного засолення. Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського Національної академії аграрних наук України].

State Enterprise "Ukrainian Research and Training Centre for Standardization, Certification and Quality". (2019). *DSTU ISO 10390:2019. Soil Quality – Determination of pH*. SE "UkrNDNC" [in Ukrainian]. [Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості". (2019). ДСТУ ISO 10390:2019. Якість ґрунту – визначення pH. ДП "УкрНДНЦ"].

State Enterprise "Ukrainian Research and Training Centre for Standardization, Certification and Quality". (2005). *DSTU ISO 14870:2005. Soil Quality – Extraction of Trace Elements Using a Buffered DTPA Solution (ISO 14870:2001, IDT)*. SE "UkrNDNC" [in Ukrainian]. [Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості". (2005). ДСТУ ISO 14870:2005. Якість ґрунту – Екстрагування слідів елементів буферним розчином DTPA (ISO 14870:2001, IDT). ДП "УкрНДНЦ"].

State Enterprise "Ukrainian Research and Training Centre for Standardization, Certification and Quality". (2005). *DSTU 4289:2004. Soil Quality. Methods for Determining Organic Matter*. O.N. Sokolovsky Institute of Soil Science and Agrochemistry of the Ukrainian Academy of Agrarian Sciences [in Ukrainian]. [Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості". (2005). ДСТУ 4289:2004. Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини. Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського Національної академії аграрних наук України].

State Enterprise "Ukrainian Research and Training Centre for Standardization, Certification and Quality". (2002). *DSTU 4115-2002. Soils. Determination of Mobile Phosphorus and Potassium Compounds by the Modified Chirykov Method*. Technical Committee for Standardization of "Soil Science" [in Ukrainian]. [Державне підприємство "Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості". (2002). ДСТУ 4115-2002. Ґрунти. Визначення рухомих сполук фосфору і калію за модифікованим методом Чирикова. Технічний комітет стандартизації "Ґрунтознавство"].

Tsyhanenko, M. O. (2015). Precision Farming System. Lecture Notes with Elements of the Credit-Module System of Organization of the Educational Process for the Course "Precision Farming System" for Students Majoring in 8.10010203 "Mechanization of Agriculture". KhNTUSG [in Ukrainian]. [Циганенко М. О. (2015). Система точного землеробства. Конспект лекцій з елементами кредитно-модульної системи організації навчального процесу з курсу "Система точного землеробства" для студентів за спеціальністю 8.10010203 "Механізація сільського господарства". ХНТУСГ].

U.S. Government Accountability Office. (2024, January 31). *Precision Agriculture: Benefits and Challenges for Technology Adoption and Use*. Full report GAO-24-105962, 1–80. https://www.gao.gov/products/gao-24-105962

Ward, R. C. (n.d.). Figure 3–1: Four Relationships between Broadcast and Band Phosphorus. In *Ward Guide (pp. 80–81)*. Ward Laboratories. [February 16, 2025]. https://www.wardlab.com/

Warncke, D., & Brown, J. (1988). Recommended Chemical Soil Test Procedures for the Central North Region. *North Central Regional Research Publication, 221* (Revised), 31–33.

Where to do soil analysis: List of agro-laboratories. (2024, November 5). *SuperAgronom*. November 15, 2024. https://superagronom.com/blog/1073-de-zrobiti-analiz-gruntu-spisok-agrolaboratoriy [in Ukrainian]. ["Де зробити аналіз ґрунту: список агролабораторій" (2024, 5 листопада). *SuperAgronom*. https://superagronom.com/blog/1073-de-zrobiti-analiz-gruntu-spisok-agrolaboratoriy].

Yatsuk, I. P., & Balyuk, S. A. (2019). Methodology for Conducting Agrochemical Land Passportization of Agricultural Land (2nd ed.). State Institution "Institute of Soil Protection of Ukraine" [in Ukrainian]. [Яцук І. П., & Балюк С. А. (2019). Методика проведення агрохімічної паспортизації земель сільськогосподарського призначення (2-ге вид.). Державна установа "Інститут охорони ґрунтів України".]

Zatserkovnyi, V. I., & Vorokh, V. V. (2024). Differential Technologies of Precision Agriculture. *Technical Sciences and Technologies*, 1(35), 292–301 [in Ukrainian]. [Зацерковний В. І., & Ворох В. В. (2024). Диференційні технології прецизійного землеробства. *Технічні науки та технології*, 1(35), 292–301].

Отримано редакцією журналу / Received: 17.12.24
Прорецензовано / Revised: 28.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ[1], д-р техн. наук, проф.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Віктор ВОРОХ[1], асп.
ORCID ID: 0009-0005-0112-8422
e-mail: fainkucha@gmail.com

Ольга ГЛОБА[1], студ.
ORCID ID: 0009-0003-4923-3374
e-mail: olgagloba73@knu.ua

Тетяна МІРОНЧУК[1], канд. філол. наук, доц.
ORCID ID: 0000 0002-5923 1028
e-mail: t_mironchuk@ukr.net

Ірина СЮЙВА[1], канд юрид. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-5001-2750
e-mail: isiuiva.knu@gmail.com

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АГРОХІМІЧНИЙ АНАЛІЗ ҐРУНТІВ У ТЕХНОЛОГІЯХ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ПРИКЛАДІ ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

В с т у п . ***Прецизійне землеробство спрямоване на створення комплексної системи підтримки прийняття рішень, що підвищує ефективність і стійкість сільськогосподарських методів. Воно ґрунтується на принципі, що поля не є однорідними та мають різні ділянки з різними характеристиками. Різноманітність ґрунтів, рельєфу, кліматичних умов та інших факторів призводить до того, що потреби рослин на різних ділянках поля відрізняються. Точне землеробство дає змогу врахувати цю різноманітність і застосовувати індивідуальний підхід до кожної ділянки.***

Представлено комплексний підхід до аналізу всіх ключових етапів агрохімічного обстеження: від підготовчого етапу до лабораторного аналізу, створення агрохімічних картограм і розробки карт потреби в добривах та карт завдань для сільськогосподарської техніки. Особливу увагу приділено можливостям використання даних ДЗЗ та геоінформаційних технологій для обробки та візуалізації результатів.

М е т о д и . ***Відбір ґрунту починається з визначення конфігурації та площі елементарних ділянок. Розглянуто кілька стратегій відбору проб ґрунту, кожне агропідприємство обирає найкращу для себе, залежно від мети та особливостей конкретного поля.***

Агрохімічні властивості ґрунту здатні істотно змінюватися навіть на невеликих ділянках поля, що потребує ретельного підходу до відбору проб для аналізу.

Р е з у л ь т а т и . ***Розроблені агрохімічні картограми – додаткові наочні матеріали, які сучасні лабораторії видають разом з агрохімічним звітом ґрунту. Це зображення на паперових та електронних носіях різних рівнів вмісту гумусу, поживних речовин у ґрунті та реакції ґрунтового розчину.***

В и с н о в к и . ***Агрохімічний аналіз ґрунту забезпечує інформацією, необхідною для оптимізації процесу диференційованого внесення добрив та насіння. На основі отриманих даних про тип ґрунту, вміст макро- та мікроелементів, органічної речовини, рівень зволоженості та інші ключові показники можна точно визначити потреби елементарних ділянок у поживних речовинах. Це дає змогу розробити ефективну стратегію агротехнічних заходів, адаптовану до конкретних умов поля.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***прецизійне землеробство, агрохімічний аналіз ґрунту, схема відбору проб, геоінформаційні технології, автоматизація сільського господарства, картографування ґрунту.***

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.

UDC 550.8+528.4
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.13

Vasyl HUDAK, PhD Student,
ORCID ID: 0009-0002-7333-0409
e-mail: gudak_vasyl@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Tetiana KRIL, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0002-4324-9231
e-mail: kotkotmag@gmail.com
Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Vitaliy ZATSERKOVNYI, DSc (Techn.), Prof.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

REMOTE SENSING ANALYSIS OF VERTICAL SURFACE DISPLACEMENTS AS AN INDICATOR OF UNDERGROUND STRUCTURE DEFORMATIONS

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

Background. *The paper is devoted to the analysis of vertical displacements based on remote sensing data as an identifier of hazardous engineering-geological processes in areas with underground infrastructure. The study was carried out on the example of the section of the tunnel between Demiivska and Lybidska stations of the Kyiv subway. In December 2023, processes of uneven compaction and vibration creep of the soil massif around the tunnel lining were detected, and there was a risk of loss of stability of the tunnel structures and an emergency.*

Methods. *This study employs the Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) method which allows monitoring of soil surface deformations through phase change analysis among radar images. The correction procedures were applied to mitigate noise in processed images caused by temporal and geometric decorrelation, atmospheric disturbances, and other noise interferences. Correction and filtering method, specifically Canny and Sobel linear filters, were used to improve accuracy. Their application to processed satellite images enhances the contours of recorded vertical displacements and reduces geometric distortion noise, preserving the structural integrity of the images. According to our calculations, effective anomaly detection in images of urbanized areas requires a minimum threshold of 25 % in image contrast and clarity. The filters' application for highlighting significant intensity changes achieved a 28 % increase in clarity, indicating high processing effectiveness for further analysis of displacement maps and other parameters related to vertical shifts.*

Results. *Abnormal zones of vertical displacements were identified within the study area based on vertical displacement data. During the 2022–2023 observation period, these zones shifted toward the metro tunnel axis. Vertical displacements directly above the area of subsidence near the 'Rozetka' store were detected during the fifth observation period, October–December 2023, coinciding with the tunnel closure for repairs. Overall, displacement values shifted from negative in 2022 to positive in 2023, suggesting that displacements may have served as an early indicator of underground structure deformation activation. The use of filters allowed for more precise identification of displacement dynamics and localization of deformation zones throughout the observation periods. In the final period, the anomalous zone aligned with the location of tunnel deformations and recorded surface subsidence.*

Conclusions. *Using the example of the distillation tunnel section, we demonstrate the possibility of using the analysis of vertical surface displacements performed by D-InSAR together with a combination of Kenny and Sobel filters to track vertical surface displacements, which is important for monitoring the condition of underground facilities and preventing possible accidents. This study lays the foundation for further development of methodological approaches to the analysis of potential deformations of underground structures based on surface dynamics (vertical displacements). Further improvement of the methodology will help to ensure the accuracy and reliability of data in the context of monitoring underground structures.*

Keywords: *Vertical surface displacements, satellite images, D-InSAR, underground structures, Demiivska metro accident.*

Background

The ability to predict the effects of hazardous geological processes on underground infrastructure, with the aim of preventing emergencies and avoiding economic and social repercussions, represents a critical challenge in assessing natural risks and disasters. Solving this issue involves two main approaches: the first approach includes targeted in-situ field research aimed at understanding the nature and refining the mechanisms behind hazardous phenomena within geological environments, taking into account natural factors and anthropogenic impacts; the second involves the development of modern, effective information and analytical tools to forecast and prevent the consequences of such processes, ensuring stable operation of engineering structures and safeguarding human life.

Large cities are often characterized by noncompliance with functional zoning standards (Ministry of Regional Development of Ukraine, 2018); for instance, energy facilities are sometimes placed unsystematically, occasionally located near residential areas, and roads with heavy traffic are often situated near residential neighborhoods. The close proximity of industrial, transport, and residential facilities, combined with complex engineering-geological conditions, can lead to increased intensity of anthropogenic impact, thereby triggering hazardous engineering-geological processes and, consequently, accidents and emergencies. Urban development impacts the geological environment in stages: from the destruction of natural surroundings (e.g., removal of vegetation and soil layers, excavation) to the introduction of new elements into the natural system (e.g., buildings, underground structures, paved areas). Ensuring the reliability and cost-effectiveness of shallow underground structures, which are characteristic of urban construction, is therefore essential for the investment attractiveness of developing underground urban infrastructure.

In early December 2023, train movement on the Obolonsko-Teremkivska line of the Kyiv Metro was suspended along the section of the running tunnel between Demiivska and Lybidska stations. This section was closed for repairs (Fig. 1b) due to the discovery of uneven soil loosening, vibrocreep processes around the tunnel, and additional loading on the tunnel lining, leading to a risk of tunnel structure instability (Kyiv City Council, 2023). Surface subsidence was also recorded near the 'Rozetka' store (Fig. 1a).

© Hudak Vasyl, Kril Tetiana, Zatserkovnyi Vitaliy, 2025

ISSN 1728-3817

a *b*

Fig. 1. Surface deformation (a) and repair work on the tunnel section (b)
(a – photo by Vlad Kolodiy/Suspilne Kyiv, 2023; b – photo by Telegraf, 2024)

This area is located at the intersection of various functional zones within the city–transport, industrial, residential, and others. The natural geological conditions of the area are complicated by anthropogenic impact. Environmental disruption in urban settings is often associated with the chaotic placement of structures from different functional zones. The most critical influences arise from changes in water levels and soil moisture. The effect of soil moisture is indirect, manifesting as increased pore pressure and higher soil humidity. Rising water levels lead to shifts in stress distribution within the subsurface, causing greater vertical displacement of soil particles (Kril, 2017). Increased soil moisture accelerates the propagation of longitudinal waves under dynamic loads, such as those generated by metro trains.

The construction of tunnels between Demiivska and Lybidska stations was carried out from 2004 to 2006. A significant portion of the tunnel lies in a floodplain and passes beneath the Lybid River. Under such challenging geological conditions, the tunnel was constructed using underground techniques with artificial water-level lowering. During metro construction and the reconstruction of the transportation interchange at Demiivska Square, cracks were observed in nearby buildings, including structural elements of the Vernadsky Library and facade damage (Kril, 2017).

The geological crosssection of this area, from top to bottom, comprises technogenic deposits (tH), alluvial soils (loams, sandy loams, sands) (aH), ravine deposits represented by sands and sandy loams (adP_{III}-H), loess-like sandy loams and loams ($edvP_{III}$-H), clay marls ($₱_2$kv), and sands of the Buchach series ($₱_2$bc). These varieties of loose soils are sensitive to subsidence and settling processes, particularly under conditions of increased moisture. Surface deformation studies, which serve as indirect markers of changes within the geotechnical environment of areas with such engineering-geological conditions, are justified and advisable to conduct using remote sensing methods.

The review of methods used in the investigation of failures in underground infrastructure (Minh et al., 2020; Italian National Research Council, 2017) highlights the significant potential of interferometric approaches for image processing. These methods support the monitoring and analysis of near-surface conditions, which are critical for ensuring safety and assessing damages. The primary methods include:

- Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR): D-InSAR identifies maximum deformation gradients, making it effective for monitoring rapid changes caused by underground activities. This method excels in urban areas where even minor displacements may have considerable implications for infrastructure. Unlike traditional InSAR, D-InSAR measures dynamic surface changes between two time points, allowing monitoring vertical or horizontal deformations caused by events such as earthquakes, volcanic eruptions, ground subsidence, or glacier movement (Serco Italia SPA, 2018).
- Small Baseline Subset (SBAS): SBAS provides lower-noise results, proving useful for safety pillar analysis in regions with hazardous engineering-geological processes. By processing data from multiple images, SBAS reduces noise, yielding more accurate insights into ground deformations (Pawluszek-Filipiak et al., 2022, Iglesias et al., 2015). This method is especially valuable for detecting long-term changes, focusing on small but stable displacements. However, it may be less effective at capturing extreme deformation gradients compared to methods like D-InSAR, which is critical in cases with sudden or localized deformations. Consequently, combining SBAS with other methods is important for a comprehensive analysis of deformation processes.
- Persistent Scatterer Interferometry (PS-InSAR): PS-InSAR is an advanced method that allows for high-resolution monitoring of vertical surface displacements (Ferretti, 2000; Nguyen et al., 2020). This technique relies on persistent scatterers – objects that remain stable over long periods and can be consistently identified in radar images. This method enables researchers to capture small displacements accurately, even under significant noise levels (Zhang et al., 2019). However, PS-InSAR also has limitations, such as dependency on a sufficient density of scatterers within the study area. In regions with low scatterer density, the method may not produce optimal results. Similar to SBAS, PS-InSAR provides reliable results in stable areas but is less sensitive to rapid changes than D-InSAR (Pawluszek-Filipiak et al., 2022).

Despite the valuable information that these methods can provide, there are issues such as geologic noise and signal strengths that can complicate the process of detecting vertical displacements. Geologic noise refers to natural variations and irregularities on the Earth's surface that can be caused by various factors such as landforms, vegetation, and seismic activity, which can interfere with the clarity of measurements (Caduff et al., 2015, Gabriel et al., 1989). This emphasizes the need for continuous improvement of processing procedures to increase their efficiency and accuracy in detecting subtle displacements.

The objective of the study is to quantify vertical surface displacements in areas with underground structures in order to evaluate surface dynamics as an indicator of the development of deformations. The following tasks were undertaken:

- Selection under specific conditions and collection of satellite data from March 2022 to December 2023;

• Processing of data using the D-InSAR method in the SNAP software environment;

• Reclassification of processed images through linear normalization of displacement scales;

• Detection of anomalous zones within the study area using linear filtering methods;

• Interpretation of results.

Methods

The D-InSAR method is an image processing technique based on Synthetic Aperture Radar (SAR) technology, allowing for the detection of Earth's surface deformations and changes by comparing radar images acquired at different times. D-InSAR utilizes existing SAR images, applying phase change analysis between images to detect even minor surface shifts with high precision. This method involves the analysis of paired images to identify surface changes between two points in time. From each pair, an interferogram is computed, providing information on surface displacements. For instance, a dataset of five images would generate sequential pairs. The method processes images based on their coherence but has limitations that can impact the accuracy of deformation measurements, reducing spatial and temporal coherence, which complicates the study of displacements (Kril, & Orlenko, 2022).

In this study, radar satellite images from the Sentinel-1A satellite, with a spatial resolution of 10 meters in paired mode, were selected to calculate vertical displacements of the Earth's surface between the Demiivska and Lybidska metro stations (see Tab. 1). The images covered the periods from March to October, October to December, and December to March 2022–2023, thus minimizing the influence of vegetation on the results. The images were downloaded in Single Look Complex (SLC) format from the official Alaska Satellite Facility (ASF Data Search, 2024) website. SAR images contain data as discrete integer Digital Number (DN) values, where each pixel's DN corresponds to the radar signal's reflectivity from a specific area of the Earth's surface (Serco Italia SPA, 2018). Processing was conducted using the open-source Sentinel Application Platform (SNAP).

Table 1

Description of analysis periods for selected Sentinel-1A paired radar images

№ of period	Duration of period	Details of paired radar images
1st	March – October 2022	S1A_IW_SLC__1SDV_20220315T154613_20220315T154646_042334_050BF4_828B S1A_IW_SLC__1SDV_20221029T154623_20221029T154656_045659_0575C5_5595
2nd	October – December 2022	S1A_IW_SLC__1SDV_20221005T154623_20221005T154653_045309_056AB6_F51F S1A_IW_SLC__1SDV_20221216T154621_20221216T154651_046359_058D81_DC17
3rd	December 2022 – March 2023	S1A_IW_SLC__1SDV_20221204T154622_20221204T154655_046184_05878D_ED29 S1A_IW_SLC__1SDV_20230322T154619_20230322T154651_047759_05BCC9_F365
4th	March– October 2023	S1A_IW_SLC__1SDV_20230310T154619_20230310T154651_047584_05B6DB_2DBD S1A_IW_SLC__1SDV_20231024T154628_20231024T154701_050909_0622FE_1382
5th	October– December 2023	S1A_IW_SLC__1SDV_20231012T154603_20231012T154630_050734_061D05_4CBE S1A_IW_SLC__1SDV_20231211T154627_20231211T154700_051609_063B2B_1AF4

Based on interferometric processing of radar data from the study area, surface deformation characteristics were obtained, specifically values for vertical displacements of the Earth's surface (Fig. 2).

As mentioned earlier, the accuracy of the results depends not only on the aforementioned factors but also on the reliability of information about the imaging system's parameters (Orlenko, 2024). The baseline, which defines the satellite configuration, has the greatest impact on accuracy, as even minor changes in the phase center can significantly affect the interferometric phase (Piestova et al., 2020). To improve result accuracy, it is necessary to consider these factors and apply corrective methods.

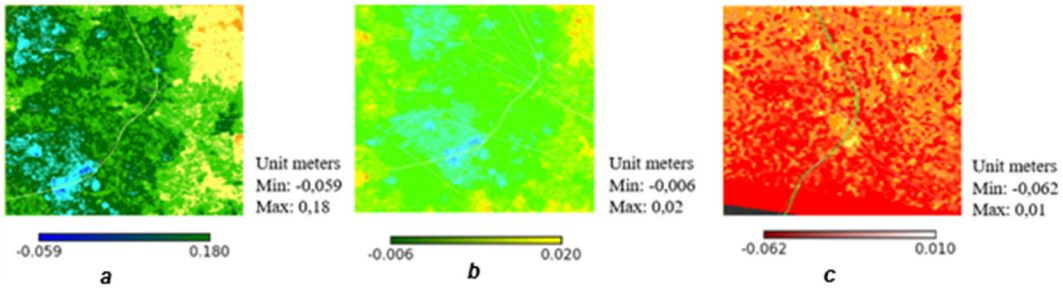


Fig. 2. Vertical displacement maps for the study area, generated using the D-InSAR method from Sentinel-1A image pairs: a) – 1st period; b) – 2nd period; c) – 3rd period

However, the real images, along with useful information, contain various noise types (Orlenko, 2024; Serco Italia SPA, 2018), including coherence noise arising from signal decorrelation between two images, especially in urban areas with rapidly changing surfaces and multiple reflectors. Additionally, moving objects like vehicles and pedestrians can create local phase distortions that complicate measurement accuracy (geometric distortion noise). Shadowing and multipath noise is caused by multiple signal reflections from different surfaces (e.g., building walls), which is especially relevant in densely built-up areas. Topographic distortions, due to shadow and overlay effects from complex terrain and tall objects, also lead to errors in height and position determination. Atmospheric noise, caused by variations in atmospheric humidity and temperature profiles between imaging times, further affects measurement accuracy, which can be intensified in urban climates. In urban areas, radio frequency interference from local sources, such as antennas, radio, and TV transmitters, may also reduce interferometric data quality by introducing additional radar signal disturbances.

To mitigate these effects, local filtering is frequently applied in practice, where integration and averaging are conducted over a relatively small neighborhood around each image point, rather than across the entire determination area x and y. The point spread function in this case has limited dimensions. This approach provides the advantage of fast processing. When working with raster images consisting of individual pixels, integration is replaced by summation. The linear transformation in the case of local filtering takes the following form (Forsyth, & Ponce, 2012):

$$g_{ij} = \sum_D a_{kl} f_{i+kj+l}, \quad (1)$$

where *g* represents the linear transformation, summing over a neighborhood *D* of the point *(i, j)* and a_{kl} denotes the point spread function value in this neighborhood.

The pixel brightness *f* at point *(i, j)* and in its neighborhood is multiplied by coefficients a_{kl} and the transformed brightness of the *(i, j)*-th pixel is the sum of these products. Typically, the set a_{kl} is represented as a rectangular matrix (mask), for example, with a size of *3×3*.

The matrix elements satisfy the condition of spatial invariance. Filtering is performed by shifting the mask from left to right (or top to bottom) by one pixel (Sonka et al., 2014). At each position, the above operations are performed, specifically multiplying the weight factors a_{kl} with the corresponding brightness values of the original image and summing the products. The resulting value is assigned to the central *(i, j)*-th pixel.

The mask typically has an odd number of rows and columns to uniquely identify the central element. The described filtering procedure is characterized by the fact that the output filter values *g* depend solely on the input values *f*. Such filters are called non-recursive, while filters where the output values *g* depend not only on the input values *f* but also on previous output values are called recursive (Forsyth, & Ponce, 2012).

Linear filters can be used not only to reduce noise but also to enhance brightness gradients and highlight edges. Vertical gradients are detected by differentiating along rows, while horizontal gradients are detected along columns. Horizontal gradients can be identified by calculating the difference in pixel brightness along a row, equivalent to calculating the second derivative in the corresponding direction (Laplacian operator). Processed images (see Fig. 1) exhibit different maximum and minimum values and corresponding color scales, complicating further data interpretation. To standardize images and present results within a unified color range, reclassification was performed using linear normalization of the displacement scale. The displacement scale normalization methodology enables a more effective analysis and interpretation of changes in the data. The normalization formula is as follows:

$$N(x) = \frac{(x - x_{min})}{(x_{max} - x_{min})}, \quad (2)$$

where *N(x)* is the normalized value, *x* is the initial value, and x_{min} and x_{max} are the minimum and maximum values in the original data, respectively.

To enhance the accuracy of satellite interferogram analysis and detect anomalous areas, such as vertical displacements or surface deformations, image processing methods based on linear filters in Python were applied. Decomposing complex filters into simpler components increases processing speed and efficiency (Sironi et al., 2015). Although the Canny and Sobel filters are mostly linear, integrating them with non-linear methods can further improve image quality by effectively reducing noise and preserving fine details. Combining linear and non-linear filtering methods allows for process optimization by addressing various noise types while preserving image structural integrity (Sironi et al., 2015). In this study, two main filtering methods were used for analyzing processed interferometric displacement maps: the Canny filter for edge detection and the Sobel filter for gradient calculation (Sonka et al., 2014). These methods allow the identification of key edges and details on interferograms in displacement maps for further analysis. The software code implementing these methods in Python is presented as a schematic (Fig. 3).

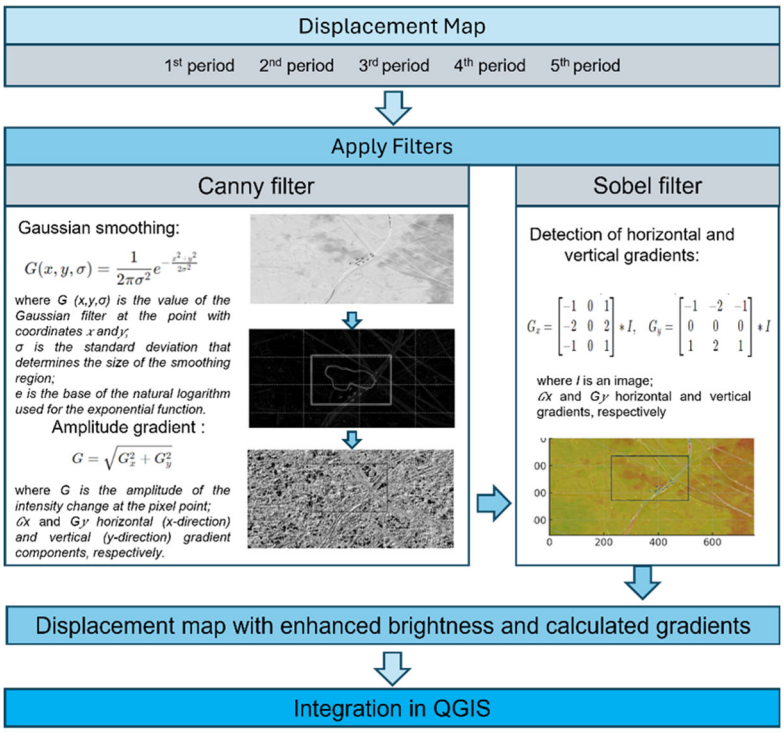


Fig. 3. Diagram of linear filter application for processed images

In the initial phase of the study, the displacement map generated in the SNAP software was loaded. For displacement map analysis, the image was converted to grayscale, allowing pixel intensity manipulation, as the focus is on brightness gradients representing deformations. Subsequently, the Canny filter, an effective method for edge detection based on pixel intensity gradient calculations, was applied. The Canny algorithm operates in several stages: first, the image is smoothed with a Gaussian filter to reduce noise. Then, intensity gradients are calculated at each point in the image. A double threshold selects potential edges by identifying points with strong gradients and those within the range between weak and strong thresholds (Zhang et al., 2019). The final stage involves suppressing continuity of weak edges not forming part of main edge lines. The result is a binary image where object edges are highlighted as bright lines.

Next, the Sobel filter is applied to calculate pixel intensity gradients in two mutually perpendicular directions: along the X and Y axes. Two different kernels are used to calculate derivatives in each direction. A kernel for the X direction computes changes in pixels horizontally, while a kernel for the Y direction captures vertical changes. The gradient magnitude at each point is computed as the vector sum of the gradients in the X and Y directions (Zhang et al., 2019). This method allows for detecting intensity changes that indicate contours and transitions between different elements in the image. The gradient magnitude reflects the sharpness of intensity variation, which can indicate deformations or other structural changes (Sironi et al., 2015).

The results obtained after applying both filtering methods are represented as images with highlighted contours (Fig. 4). For comparison, color scales and data normalization are used to ensure a consistent interpretation of displacement magnitude across different parts of the displacement map. This enables the identification of anomalous areas where changes in vertical surface displacements are observed.

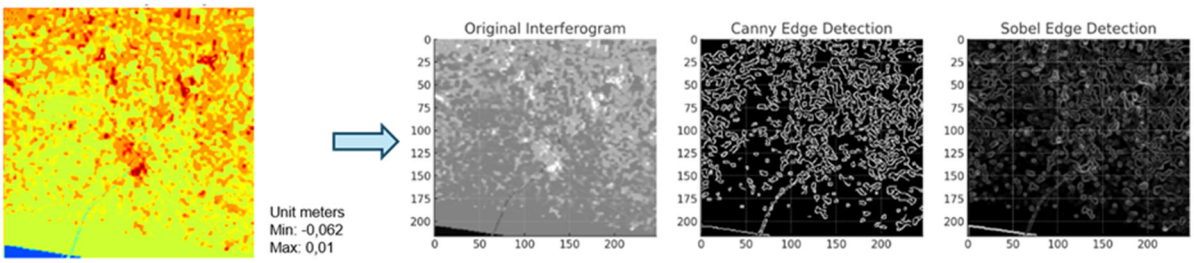


Fig. 4. Result of linear filter application for processed image during the 3rd period

To assess the degree of anomaly enhancement, the average values of contrast and sharpness are calculated for images before and after filter application. Contrast is defined as the difference between the mean pixel intensities of anomaly regions and the general background. An increase in this measure indicates better anomaly differentiation. Sharpness can be measured as the mean variability of gradients in the image; higher gradient levels after processing indicate improvement. Using pre- and post-processed images, pixel intensity values in anomaly and background areas are computed for each filter. The formula to determine the percentage of image improvement is presented as follows:

$$Result\ (\%) = \frac{(C_{before} - C_{after})}{C_{before}} \times 100\%, \qquad (3)$$

where C_{before} and C_{after} represent contrast or sharpness measures before and after processing, respectively.

After calculating data for both images (pre- and post-linear filter application), we obtain a percentage improvement. This quantifies how much clearer and more distinct the anomalies appear on the processed images. If improvement significantly exceeds 10–20 % (Schowengerdt, 2007; Gonzalez, & Wood, 2018), this suggests that the filters effectively highlight anomalies for further analysis. According to our research, improvement should be no less than 25 %. The difference between the original and filtered images, based on contrast, sharpness, and the number of detected edges, is computed in Python (Fig. 5).

Initially, both the original and filtered images, including filter results, are loaded into Python (see Fig. 5). For intensity gradient calculations, the Laplace operator is used to detect sharp pixel intensity transitions. The Laplacian effectively highlights areas of sharp intensity transitions, corresponding to edges or anomalies, aiding in quantitative evaluation of image sharpness and contrast (Gonzalez, & Wood, 2018). The percentage improvement for each pixel is calculated as the relative difference between the absolute gradient values of the processed and original images, allowing the assessment of local intensity changes. To avoid infinite values where the original gradient is zero, improvement at such pixels is set to zero. Then, the mean improvement across all pixels is calculated, providing an overall representation of texture changes after combined filtering. This mean value reflects the general intensity of changes between adjacent pixels, indicating edge enhancement quality. Following these procedures, the percentage improvement for each processed image is computed using formula (3), resulting in a 28 % improvement for the processed displacement maps. This figure indicates the effectiveness of the applied filters in highlighting specific characteristics, such as anomalies (vertical displacement values ∆h), which is essential for further data analysis.

The combination of these filters enables more precise information on displacement dynamics and the localization of deformation zones (Fig. 6), which is crucial for monitoring and identifying underground structure deformations.

This approach has allowed for the identification of areas with localized anomalous surface displacements that differ from the background values. Such zones may indicate potential deformations within the geotechnical environment. Values deviating from the average (background values of the area) may point to zones of potential subsidence or surface uplift, depending on the sign of the magnitude (Kril, & Orlenko, 2022).

The processed data was integrated into QGIS for further analysis and interpretation of potential risks of deformation of underground structures. The use of displacement calculations allowed visualizing the areas of subsidence and uplift of the surface of the study area, which contributed to a more accurate assessment of potential risks and possible future events. To highlight anomalous zones on the vertical displacement maps, we used a change in image gradation, which made it possible to identify areas with significant subsidence or uplift.

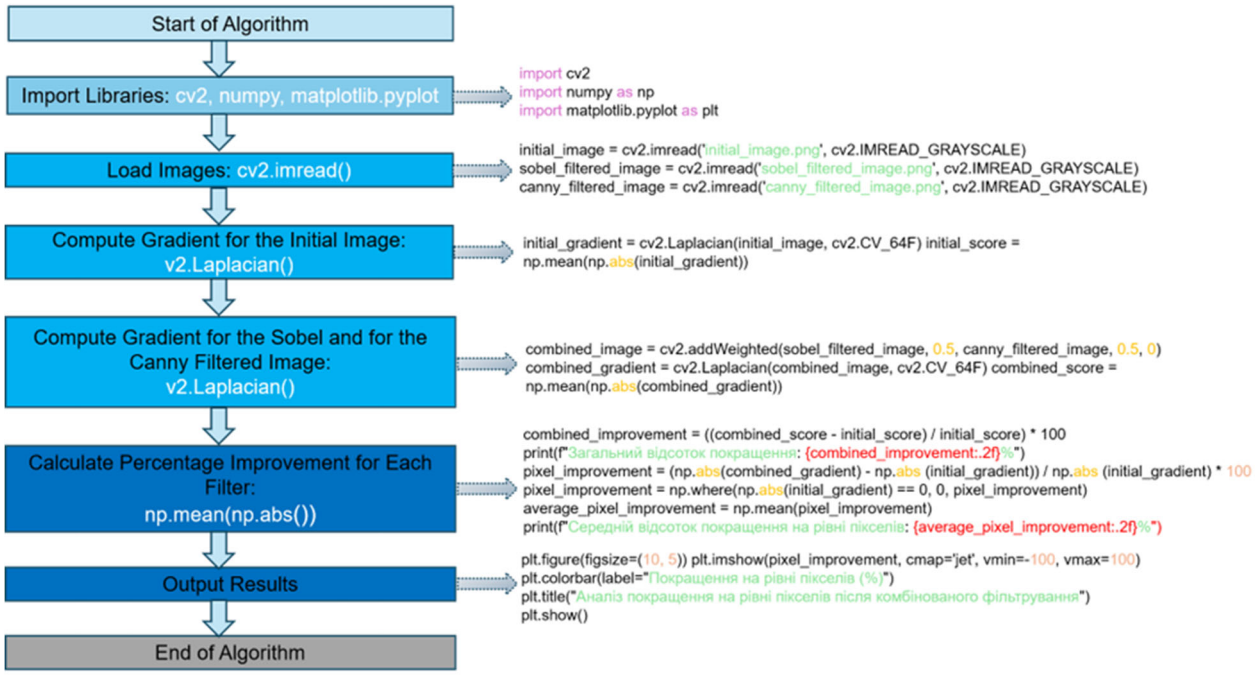


Fig. 5. The image comparison algorithm before and after filter application in Python environment

Visualization in QGIS was customized through the Symbols panel, where color gradations were used according to the displacement values. Rich and contrasting colors, such as red and blue, were used to clearly highlight anomalous areas, and setting thresholds for each category of displacement ensured that the display was sensitive, allowing even small changes to be identified (QGIS Documentation, n.d.). The Classification tool in QGIS helped to divide the data into different intervals, which made it easier to interpret the results and highlight specific areas that require special attention.

The contour analysis tool was used to automatically identify and outline the anomalous vertical displacement zones. Initially, the dataset containing the offset values was prepared as a raster layer. This format ensures high accuracy of spatial calculations and allows interpolation of contours based on numerical values (QGIS Documentation, n.d.). Then, using the Raster > Analysis > Contour menu in QGIS, the Contour tool was applied. The tool's parameters were configured in accordance with the specifics of the study, namely, the interval of isolines set the boundary values of displacements that delimited zones with different levels of risk. The resulting vector layer of contours was further stylized using color gradations and line thicknesses, which improved the visual delineation of subsidence or uplift risk zones. The classification of intervals in QGIS allowed us to detail the zones of abnormal changes, which made it possible to assess potential risks and possible future events in more detail.

Results

The assessment of vertical displacements was conducted over five periods within the defined study area, indicated by the black rectangle in Fig. 6c. Regions exhibiting anomalous zones, where the recorded Δh values significantly differ from the background levels within the study area, were identified. During periods 3–4, these anomalous zones are situated 75–160 m northwest of the tunnel within the study area, while in the southeastern section, they intersect the tunnel (Fig. 6a, b).

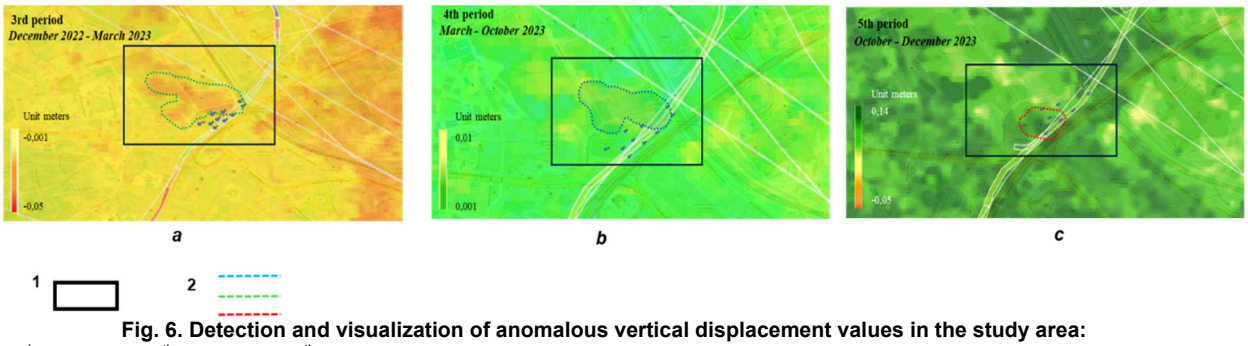


Fig. 6. Detection and visualization of anomalous vertical displacement values in the study area:
a) – 3rd period; b) – 4th period; c) – 5th period; 1 – the boundaries of the study area; 2 – contours of abnormal vertical displacements (Δh)

In the classified images for the fifth period, an anomalous zone appeared directly above the tunnel damage location (Fig. 6c). Over the three represented periods, the anomalous zones are observed to shift progressively toward the tunnel axis.

For displacement analysis, 10 control points were selected: four points directly above the metro tunnel (points 2, 3, 4, and 7), four points parallel to the tunnel, 35 meters to the left of the tunnel axis (points 1, 5, 6, and 8), and two points located 75 meters away (points 9 and 10). The vertical displacement values at these points for each observation period are presented in Tab. 2.

Table 2

The surface vertical displacements (m) for control points of the study area for different time periods

Point №	Observed time periods					Average value
	1st period	2nd period	3rd period	4th period	5th period	
	March – October 2022	October – December 2022	December 2022 – March 2023	March– October 2023	October– December 2023	
1	-0,09	-0,053	-0,034	0,085	0,116	0,0048
2	-0,078	-0,053	-0,041	0,051	0,108	-0,0026
3	-0,027	-0,03	-0,032	0,09	0,117	0,0236
4	-0,061	-0,057	-0,041	0,051	0,108	0
5	-0,09	-0,061	-0,039	0,064	0,11	-0,0032
6	-0,084	-0,036	-0,029	0,108	0,121	0,016
7	-0,088	-0,058	-0,018	0,142	0,133	0,0222
8	-0,088	-0,037	-0,019	0,138	0,132	0,0252
9	-0,069	-0,044	-0,039	0,057	0,109	0,0028
10	-0,072	-0,061	-0,046	0,04	0,102	-0,0074

The analysis of the obtained values reveals the following trends (Fig. 7). In the first study period (March–October 2022), the overall background Δh values are negative, ranging from -0.027 to -0.09. This indicates a phase with signs of surface subsidence or a downward trend. In the second period (October–December 2022), the negative values persist, but their absolute magnitude decreases, suggesting a slowing of subsidence dynamics and the beginning of stabilization (Δh → 0). Starting from the third period (December 2022–March 2023), a slight increase in values is observed, which continues into the fourth period (March–October 2023), where overall background values become exclusively positive. The fifth period (October–December 2023) solidifies these positive values, demonstrating stability following the previous increase. In this period, the identified anomalous zone coincides with the tunnel deformation and surface subsidence area, located near the 'Rozetka' store. Background Δh values are close to zero, indicating a leveling after the previous decline.

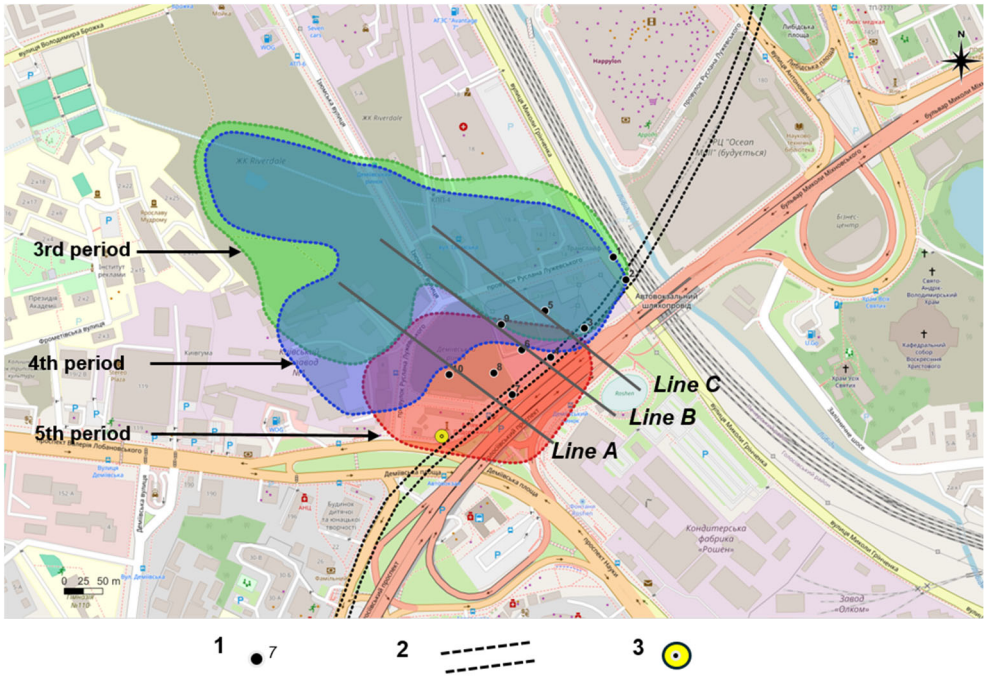


Fig. 7. Anomalous zones of vertical displacements within the study area across different time periods of observation:
1 – control points; 2 – subway tunnel; 3 – location of the 'Rozetka' store

The average vertical displacement at control points from March 2022 to December 2023 was 0.008 m. Average vertical displacements over five periods ranged from -0.03 m to 0.142 m. In 2022, a trend of surface subsidence was observed, with background values ranging from -0.061 m to -0.03 m. Absolute displacement values decreased from December 2022 to March 2023, with a mean absolute value of |0.0338| m.

In 2023, vertical displacements across the study area were generally positive (Fig. 8). Between March and October 2023 (4th period), positive surface displacements were recorded, with a maximum value of 0.142 m, which remained stable until December 2023, with a maximum recorded value of 0.133 m across ten control points. This may indicate changes in stress within the geotechnical environment in the study area.

The comparison of displacements at control points along lines over the metro tunnel (Line B, see Fig. 7) showed that, despite overall positive displacements, values directly above the tunnel were 0.035 m lower than those at a distance of 35 meters and 0.0145 m lower than those at 75 meters. This indicates that the surface directly above the tunnel undergoes more significant subsidence than areas located 100 m away, leading to the formation of subsidence zones (Fig. 8).

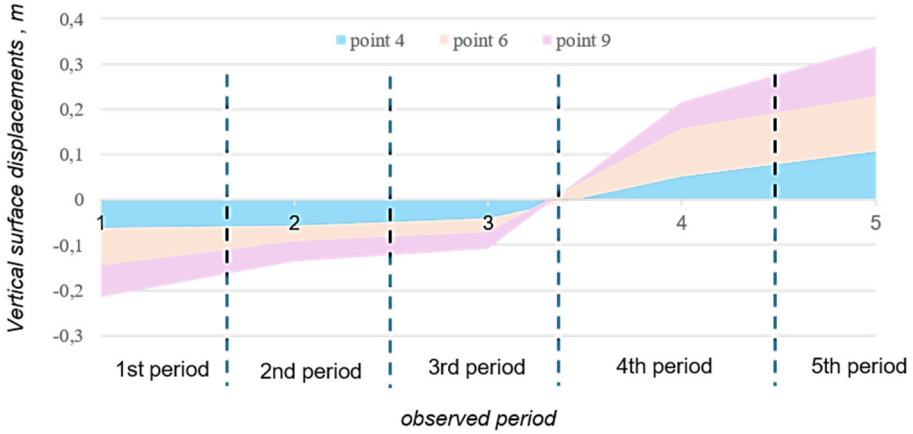


Fig. 8. Vertical displacements at control points 4. 6. 9 along line B

Discussion and conclusions

Using the section of the tunnel between the Demiivska and Lybidska stations as a case study, this research demonstrates the feasibility of employing vertical surface displacement analysis from remote sensing data as an indicator of deformation in underground infrastructure. Data processing utilized D-InSAR methods in combination with linear filters.

Interpretation was conducted with linear filtering and normalization techniques, allowing the visualization and comparison of images on a unified color scale and consistent gradient for vertical displacements. The combination of linear filtering methods optimized processing by addressing noise types such as geometric distortions, shadowing, and multipath noise, while maintaining the structural integrity of the image. Our findings indicate that for significant results, an improvement rate of at least 25 % is required. Applying linear filters to the study images achieved a 28 % enhancement in contrast and sharpness, demonstrating the effectiveness of these methods for anomaly detection in subsequent analysis. The results underscore the importance of quantitative assessment of clarity and contrast for more precise identification of specific features in processed data, particularly in complex, noisy, or low-contrast images of urbanized areas.

Despite the significant image quality improvement provided by these methods, challenges remain in balancing noise reduction with the preservation of critical image details, highlighting the need for ongoing research in this area.

Throughout the observation periods, anomalous zones were observed to shift toward the tunnel axis. During the last period, the anomalous zone coincided with the deformation site of the tunnel and surface subsidence (near the 'Rozetka' store). Observations from March 2022 to December 2023 indicated both positive and negative displacements across the study area: negative displacements were observed in periods 1–3 (2022) and positive displacements in periods 4–5 (2023). In each period, control points directly above the tunnel (points 2, 3, 4, and 7) exhibited anomalous values compared to background levels across the study area.

This research establishes a foundation for the further development of methodological approaches to analyzing potential deformations in underground structures based on indicative features of surface dynamics–specifically, vertical displacements. Its practical application is crucial for monitoring the status of Kyiv Metro lines, particularly shallow-depth lines like the Obolonsko-Teremkivska line, and for preventing similar incidents in the future.

The research was conducted within the framework of the scientific theme III-5-23, "Engineering and Geological Foundations for Urban Development and the Strategic Mastery of Underground Space," state registration number is 0123U100129.

Authors' contribution: Vasyl Hudak – writing (review and editing), methodology; Tetyana Kril – conceptualization, data validation, methodology, writing (original draft); Vitalii Zatserkovnyi – formal analysis.

References

Caduff, R., Schlunegger, F., Kos, A., & Wiesmann, A. (2015). A review of terrestrial radar interferometry for measuring surface change in the geosciences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 208–228. https://doi.org/10.1002/esp.3656

Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), 2202–2212. https://doi.org/10.1109/36.868878

Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2012). *Computer vision: A modern approach* (2nd ed.). Pearson.

Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183–9191. https://doi.org/10.1029/JB094iB07p09183

Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson. https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf

Iglesias, R., Mallorqui, J. J., Monells, D., López-Martínez, C., Fabregas, X., Aguasca, A., & Corominas, J. (2015). PSI deformation map retrieval by means of temporal sublook coherence on reduced sets of SAR images. *Remote Sensing*, 7(1), 530–563. https://doi.org/10.3390/rs70100530

Italian National Research Council. (2017). A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements. *Applied Sciences*, 7(12), 1264. https://doi.org/10.3390/app7121264

Kril, T. (2017). Causes of some hazardous engineering geological processes on urban territories. *3rd International Conference on Applied Geophysics E3S Web of Conferences*, 24, Article 01009. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172401009

Kril, T., & Orlenko, T. (2022). Surface Dynamics Assessment as a Landslide Hazard Factor by Remote Sensing Data. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2022, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580246

Kyiv City Council. (2023, December 8). Train services between the metro stations 'Demiyivska' and 'Teremky' will be closed from December 9 for urgent repair of the transit tunnel. *Kyiv City Portal*. https://kyivcity.gov.ua/news/rukh_pozdiv_mizh_stantsiyami_metro_demivska_ta_teremki_zakriyut_iz_9_grudnya_dlya_terminovogo_provedennya_remontu_peregrinnogo_tunelyu/

Minh, D. H. T., Hanssen, R., & Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, 12(9), 1364. https://doi.org/10.3390/rs12091364

Ministry of Regional Development of Ukraine. (2018). *Content and structure of the zoning plan. DBN B.1.-22:2017* (effective from 2017-12-27). (State Building Codes of Ukraine).

Nguyen, C. G., Dang, V. K., & Vu, A. T. (2020). Monitoring land subsidence evolution in the central urban region of Hanoi City, Vietnam. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 11(6), 18–30. https://doi.org/10.34218/IJCIET.11.6.2020.003

Orlenko, T. A. (2024). *Remote geoecological monitoring technique for landslide processes: An example of the right bank of the Kaniv Reservoir* [Doctoral dissertation, State Institution "Scientific Center for Aerospace Research of the Earth, Institute of Geological Sciences, National Academy of Sciences of Ukraine"]. https://www.casre.kiev.ua/images/files/phd/orlenko/FINAL_Diss_Orlenko.pdf

Pawluszek-Filipiak, K., Ilieva, M., Wielgocka, N., & Stasch, K. (2022). Evaluation of synthetic aperture radar interferometric techniques for monitoring of fast deformation caused by underground mining exploitation. https://doi.org/10.4995/JISDM2022.2022.13863

Piestova, I., Dugin, S., Orlenko, T., & Svideniuk, M. (2020). Assessing and forecasting landslide hazards of The Right Bank of the Kanev reservoir based on radar remote sensing data with corner reflectors using. *XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 1, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056082

QGIS Documentation. (n.d.). Creating contours and using interpolation in QGIS. *QGIS Training Manual*. Retrieved November 10, 2024, from https://docs.qgis.org/latest/en/docs/training_manual/processing/interp_contour.html

Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote sensing: Models and methods for image processing* (3rd ed.). Academic Press.

Serco Italia SPA. (2018). *Land Subsidence with Sentinel-1 using SNAP* (Version 1.2). Retrieved from RUS Lectures at https://rus-copernicus.eu/portal/the-rus-library/learn-by-yourself/

Sironi, A., Tekin, B., Rigamonti, R., Lepetit, V., & Fua, P. (2015). Learning Separable Filters. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(1), 94–106. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2014.2343229

Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2014). *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Cengage Learning.

Zhang, L., Li, X., & Yang, J. (2019). Recent advances in edge detection: A review. *IEEE Access*, 7, 76774–76793. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2022.06.083

Отримано редакцією журналу / Received: 26.12.24
Прорецензовано / Revised: 24.01.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Василь ГУДАК, асп.
ORCID ID: 0009-0002-7333-0409
e-mail: gudak_vasyl@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Тетяна КРІЛЬ, канд. геол. наук,
ORCID ID: 0000-0002-4324-9231
e-mail: kotkotmag@gmail.com
Інститут геологічних наук, Національна академія наук України, Київ, Україна

Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ, д-р техн. наук, проф.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ДИСТАНЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ЯК ІНДИКАТОРІВ ДЕФОРМАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ СПОРУД

В с т у п . ***Присвячено аналізу вертикальних зміщень за даними дистанційного зондування як ідентифікатора небезпечних інженерно-геологічних процесів на ділянках із підземною інфраструктурою. Дослідження проведено на прикладі ділянки перегінного тунелю між станціями "Деміївська" і "Либідська" Київського метрополітену. У грудні 2023 р. виявлено нерівномірні процеси розущільнення, віброповзучості ґрунтового масиву навколо тунельної оправи та з'явився ризик втрати стійкості тунельних споруд і виникнення аварійної ситуації.***

М е т о д и . ***У досліджені застосовано метод диференціальної інтерферометрії D-InSAR, що використовується для моніторингу деформацій земної поверхні через аналіз фазових змін між радіолокаційними зображеннями. Для прибирання шумів на опрацьованих зображеннях через часову та геометричну декореляцію, атмосферні збурення і шумові перешкоди використано низку корекційних процедур. Для підвищення точності значень застосовано корекційні та фільтраційні методи, а саме лінійні фільтри Кенні та Собеля. Їх застосування до опрацьованих космічних знімків дало змогу підсилити контури зафіксованих вертикальних зміщень та зменшити шум геометричних спотворень, зберігаючи структурну цілісність зображень. За нашими розрахунками для ефективного виявлення аномалій на знімках урбанізованих територій потрібен мінімальний поріг у 25 % контрастності та чіткості зображення. Використання фільтрів для підкреслення інтенсивних змін дало змогу досягти 28 % підвищення чіткості, що свідчить про високу ефективність обробки для подальшого аналізу карт зміщень та інших параметрів, пов'язаних із вертикальними зміщеннями.***

Р е з у л ь т а т и . ***За вертикальними зміщеннями на досліджуваній території встановлено аномальні зони. За спостережний період 2022–2023 рр. зафіксовано їх переміщення у напрямку до осі тунелю метро. Вертикальні зміщення безпосередньо над місцем провалів поряд із магазином "Розетка" виявлено у п'ятий спостережуваний період – жовтень–грудень 2023 – час закриття тунелю на ремонтні роботи. Загалом значення зміщень з від'ємних у 2022 р. змінилися на додатні в 2023 р., що вказує на те, що зміщення могли стати одним з індикаторів активізації деформацій підземної споруди. Використання фільтрів дало змогу отримати точнішу інформацію про динаміку переміщень та локалізацію зон деформації протягом періодів спостереження. В останньому періоді аномальна зона збіглася з місцем деформацій тунелю та осідання поверхні.***

В и с н о в к и . ***На прикладі ділянки перегінного тунелю показано можливість використання аналізу вертикальних зміщень поверхні, проведеного методом D-InSAR разом з комбінацією фільтрів Кенні та Собеля для відстеження вертикальних зміщень поверхні, що є важливим для моніторингу стану підземних об'єктів та упередження можливих аварій. Це дослідження закладає основу для подальшого розвитку методологічних підходів до аналізу потенційних деформацій підземних конструкцій на основі динаміки поверхні (вертикальних зміщень). Подальше вдосконалення методології сприятиме забезпеченню точності і надійності даних у контексті моніторингу підземних конструкцій.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***вертикальні зміщення земної поверхні, супутникові знімки, D-InSAR, підземні споруди, аварія на станції метро "Деміївська".***

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 528.9:004.05
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.108.14

Дмитро ЛЯШЕНКО, д-р. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-5588-0322
e-mail: uageog@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Іванна ЗОБНІВ, студ.
ORCID ID: 0000-0003-0365-4547
e-mail: ivannazobniv333@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Олександр ЦВИК, асп.
ORCID ID: 0009-0006-5464-2078
e-mail: tsvik1603@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

КАРТОГРАФУВАННЯ МІННОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЗА ДАНИМИ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ ЗНІМАНЬ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)

В с т у п . *Наслідком повномасштабної збройної агресії проти України є значні зміни природних та антропогенних ландшафтів. Це негативно впливає на безпеку населення та розвиток економіки країни. Надзвичайну загрозу становлять міни, нерозірвані боєприпаси та інші вибухонебезпечні об'єкти. Для ідентифікації мін проаналізовано можливості використання спектрозональних знімків, отриманих з БПЛА для картографування.*

М е т о д и . *Для завдань картографування використано отримані з БПЛА зображення високого розрізнення тестових знімань полігону, розташованого в Хмельницькій області (Україна), з муляжами мін, розміщеними на поверхні та невеликій глибині. Оброблення даних виконано в ArcGIS PRO з використанням програмування мовою Python.*

Р е з у л ь т а т и . *У роботі виконано порівняння методів дистанційної ідентифікації мін різними сенсорами за літературними джерелами. Апробовано методику дешифрування геозображень високого просторового розрізнення, отриманих з БПЛА у видимому та тепловому діапазонах спектра для виявлення мін на відкритих ділянках для завдань гуманітарного розмінування. Набув подальшого розвитку алгоритм оброблення знімків для ідентифікації мін, аналізу та інтерпретації результатів за допомогою мови Python.*

В и с н о в к и . *Порівняльний аналіз та експериментальні роботи підкреслюють ефективність використання багатоспектральних зображень, зокрема, розрахованого на їх основі індексу вологості ґрунту (Soil Water Index – SWI) для ідентифікації мін на багатоспектральних зображеннях, отриманих з БПЛА. Використання SWI забезпечує точність ідентифікації мін лише близько 70 %в і може бути використаний лише для попередньої оцінки забруднення територій вибухонебезпечними предметами.*

К л ю ч о в і с л о в а : *гуманітарне розмінування, БПЛА, ДЗЗ, вегетаційні індекси, дешифрування, автоматизація, картографування.*

Вступ

Збройні конфлікти в різних частинах світу зумовлюють значні зміни у природних та антропогенних ландшафтах. Сучасні війни справляють значний вплив на суспільство та природу: у воєнних діях беруть участь численні збройні формування; значною є чисельність людських втрат; від воєнних дій потерпають великі площі; боєприпаси завдають значних руйнувань; ландшафти зазнають масштабних змін (Hupy, 2008).

Накопичений досвід свідчить, що крім фізичного впливу: порушення рельєфу (Стецюк, & Ковальчук, 2019), ущільнення ґрунтів, зміни гідрологічного режиму поверхневих та підземних вод, зміни вмісту хімічних речовин у воді та ґрунтах (Bonchkovskyi et al, 2023) – зростає небезпека життя і здоров'я людей через мінування та значну кількість боєприпасів, що не розірвалися. Наземні міни та інші вибухонебезпечні пристрої не тільки встановлюються вручну але й дистанційно. На жаль, розроблення засобів протимінної боротьби перебуває у стані затяжної системної кризи (Горбулін, 2022). Вибухонебезпечні предмети (ВНП) на території України, де відбувалися бої, становлять довгострокову гуманітарну та економічну загрозу для постраждалих громад (Baur et al., 2020).

Ці обставини зумовлюють актуальність завдання пошуку та ідентифікації мін та інших вибухонебезпечних предметів на території України, про що йдеться в Національній стратегії протимінної діяльності на період до 2033 р. (Про схвалення Національної стратегії, 2024).

Огляд останніх досліджень і публікацій та формулювання цілей статті. Засоби протимінної боротьби та розмінування доволі різноманітні. Робота із звичайними ручними міношукачами з металодетекторами (Alqudsi et al., 2021) супроводжується підвищеним ризиком для сапера. Як носії обладнання використовуються наземні безпілотні платформи та безпілотні літальні апарати (БПЛА) (Baghbadorani et al, 2022). В роботі (Довбня, 2024) виконано детальний порівняльний аналіз функціональних можливостей наземних дронів для розмінування території.

Розпізнавання мін відбувається на основі тематичного дешифрування, процесу виявлення, розпізнавання та інтерпретації різної інформації за зображеннями земної поверхні (Довгий та ін., 2019). Використовують сенсори, що працюють у різних діапазонах спектра, явище електромагнітної індукції, а також тварин для пошуку мін: собак, гризунів і навіть бджол (Kasban et al., 2010). У роботі (Alqudsi et al., 2021) детально проаналізовано принципи та складність розпізнавання мін залежно від використаних технологій.

Зазначається про успішне використання радіолокаційних знімань радаром із синтезованою апертурою (можна створити тривимірні моделі поверхні Землі високої просторової розрізненості (Baghbadorani et al., 2022). Натомість радар з проникаючим випроміненням (георадар) дає змогу реконструювати образи підземних цілей, враховуючи різну швидкість поширення ЕМХ в повітрі та ґрунті різної щільності та захованих під землею предметів. Зображення профілю ґрунту та похованих у ньому об'єктів виконують за допомогою алгоритмів, але швидкість ЕМХ в ґрунті має бути правильно оцінена для забезпечення

© Ляшенко Дмитро, Зобнів Іванна, Цвик Олександр, 2025

добре сфокусованого зображення та зменшення помилкових ідентифікацій (Fernández et al., 2018).

Вибухонебезпечні предмети та процес їх виявлення можна класифікувати за типом (протипіхотні, протитанкові міни, міни-"пелюстки"); матеріалом корпусу (метал, пластик); зовнішніми умовами середовища, зокрема: глибиною залягання; порою року, коли відбувається пошук мін, часом доби та погодними умовами (сонячна, хмарна погода, дощ); фізико-географічними умовами місцевості (вологість ґрунту, його механічний склад, наявність рослинності тощо) (Miller et al., 2022); використаними технологіями (георадари, магнітометри, металодетектори, ультразвукові сенсори, аналізатори випарів вибухових речовин, зображення у видимому та інфрачервоному діапазоні). Транспортування сенсорів може здійснювати піший оператор, наземний дрон, БПЛА тощо. На нашу думку, найбільш точна ідентифікація мін у різних умовах зовнішнього середовища може бути досягнута шляхом комбінації різних методів та залежатиме від типу мін і стану середовища.

Позитивні результати також дає використання багатоспектральних сенсорів, зокрема класифікація на основі модифікованого фільтру виявлення обмеженої мінімізації енергії (Constrained Energy Minimization – CEM) (Elbakary, & Alam, 2008).

Ефективність знімання в тепловому (інфрачервоному) діапазоні залежить від стану середовища на момент знімання, а його недоліком є те, що виявляються лише об'єкти, закладені на глибині менш ніж 15 см (Kasban, 2010). Повідомляється (Deans et al, 2006) про метод виявлення закопаних сурогатних наземних мін за допомогою імпульсного термографічного методу, керованого потужним інфрачервоним нагрівачем, унаслідок дії якого на поверхні утворювався сухий шар піску, за температурою якого визначалася наявність міни в певному місці (Deans et al, 2006). Теоретичні моделі розподілу температури в ґрунті, розроблені для визначення його теплових сигнатур для пошуку заглиблених наземних мін, розробили (Lamorski, et al, 2002).

Лідарні знімання передбачають використання коротких імпульсів випромінювання в оптичному діапазоні. В результаті отримують хмару точок з просторовими координатами, на основі якої будують цифрову модель рельєфу і цифрову модель місцевості, які можуть бути допоміжним засобом ідентифікації мін, особливо якщо міни розміщені на поверхні або на поверхні залишилися сліди (борозни, заглиблення, вирви) від їх закладання.

Вибір технологічних рішень виявлення мін у підсумку має забезпечити оптимальні умови для проведення спостережень у різних діапазонах спектра. Для цього автори (Popov et al, 2022) запропонували розробити цільову базу даних із спектральними портретами об'єктів різних видів ВНП і типовими спектральними характеристиками ґрунтових покривів для підвищення ефективності дистанційного автоматизованого виявлення мін.

Зважаючи на викладене, одним з актуальних завдань є складання карт замінованих українських територій, потрібних для планування проведення робіт з їх розмінування (Горбулін, 2022). Вітчизняні дослідження (Popov et al., 2022) показали, що частота помилкових спрацьовувань при виявленні мін сенсорами, побудованими лише базі оптичних датчиків, доволі висока. Тому вдосконалення методології ідентифікації мін за багатоспектральними зображеннями є актуальним.

***Мета роботи*:** опрацювати теоретичні та методологічні питання дешифрування даних ДЗЗ високого просторового розрізнення у видимому та інфрачервоному діапазонах і картографування мінних полів. Досягнення цієї мети передбачає вирішення таких завдань:

- вивчення і узагальнення досвіду використання даних дистанційного зондування для картографування мінної небезпеки;
- вдосконалення методики автоматизованого виявлення мін за багатоспектральними зображеннями, одержаними з безпілотних літальних апаратів коптерного типу (джерела даних, підходи, методи, апаратне та програмне забезпечення);
- апробація дистанційної ідентифікації та картографування мінних полів за результатами знімань на тестових ділянках та оцінювання точності робіт.

***Об'єкт дослідження*.** Досліджувана територія розташована на околиці села Мукша Китайгородська, у Слобідсько-Кульчієвецькій сільській територіальній громаді Кам'янець-Подільського району Хмельницької області.

Методи

У роботі використано масив знімків з БПЛА, отриманих Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України. Знімання проведено разом з фахівцями інженерних військ ЗСУ у весняно-літній сезон (травень–червень) 2021 р. (Popov et al., 2022) на експериментальному полігоні, де були розміщені муляжі мін. Використано легкі БПЛА коптерного типу DJI і Parrot. Набір бортових сенсорів містив кольорову цифрову камеру P12.4K, багатоспектральну камеру із сенсорами видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів P4MS і теплову інфрачервону камеру FLIR One Pro. Для планування місій спостережень використано DJI Ground Station Pro і знімки тестових ділянок прямокутної форми (довжина сторін від 30 до 80 м, висота аерофотознімання в межах 2–10 м). Ортофотомозаїка формувалася з геозображень, отриманих з висоти 50–100 м. Важливим завданням при цьому було забезпечення близьких значень відстані між двома послідовними центрами пікселів, виміряними на землі (ground sample distance – GSD) для знімків з різних сенсорів шляхом підбору відповідних висот фотографування (Popov et al., 2022).

В ході авторських робіт набула подальшого розвитку методика (рис. 1). До складу робіт входить формування завдання на створення карти, що забезпечує її актуальність, достовірність, повноту, зручність використання. Передбачається доступність карт для користувачів у різних форматах (друковані карти, електронні карти для десктопів та мобільних пристроїв).

Google Earth, Planet Labs) та наявних картографічних матеріалах. Польове обстеження (Miller et al., 2022) має враховувати фізичні властивості ґрунту (структуру, вологість, щільність) для прогнозування ефективності робіт.

Планування місії (визначення оптимальної дати та часу польових робіт для зниження витрат на окремий БПЛА, підвищення безпеки польотів, скорочення часу виконання робіт, з урахуванням зміни погодних умов, специфікаціями БПЛА, забезпечення уникнення зіткнень з рухомими об'єктами і з нерухомими перешкодами).

Виконання знімань в сучасних умовах складається з: отримання дозволу від військової адміністрації, розгортання групи на ділянці (від кількох годин до кількох днів); налаштування БПЛА близько 20 хвилин. На ділянці попередньо розташовують маркери, які будуть чітко видно на отриманих зображеннях та визначають їх координати наземними методами з сантиметровою точністю. Власне знімання містить операції зльоту, посадки після чого виконується завантаження даних з БПЛА на комп'ютер.

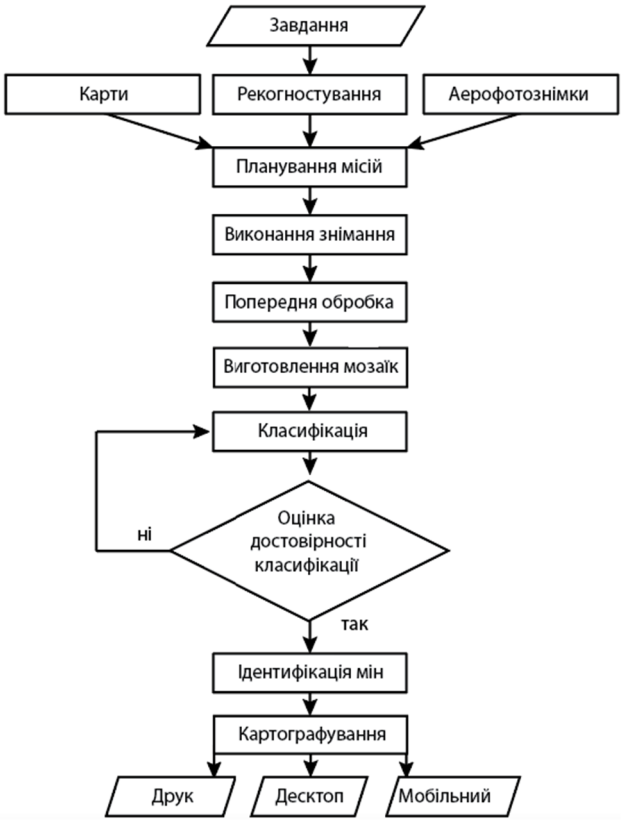


Рис. 1. Алгоритм картографування мінних полів за (Popov et al., 2022) із доповненнями авторів

Рекогностування виконується на основі даних (Оброблення даних виконано в середовищі ArcMap та застосовано інструмент калькулятор растрів. Програмування задачі передбачає використання алгоритму для обробки та аналізу зображень з метою автоматизації процесу виявлення мін на аерофотознімках. Суть алгоритму, – попіксельна класифікація мозаїки ортофотозображень методом бінарної логістичної регресії. В результаті класифікації кожен піксель мозаїки зображення віднесено до одного з двох класів: 1) елемент місцевості з міною; 2) елемент місцевості не містить міни. Такий масив даних є головним джерелом карт мінних полів, на якій клас зображення "елементи місцевості з міною" має відповідне умовне позначення. Для оброблення даних та візуалізації використано код мовою Python з використанням бібліотеки OpenCV для роботи із зображеннями. Основні етапи оброблення та аналізу дистанційних даних:

а) попереднє оброблення зображень (радіометрична та просторова корекція, регуляризація, фільтрація шумів і спотворень, географічна прив'язка);

б) створення мозаїки з оброблених зображень;

в) згладжування мозаїки зображень для підвищення якості зображення та полегшення подальшого аналізу;

г) підготовка навчальних даних для алгоритму класифікації;

д) побудова моделі класифікації та оптимізація її параметрів;

е) виконання попіксельної класифікації мозаїки зображень за допомогою навченої моделі для виявлення мін;

є) аналіз якості отриманих результатів, розрахунок параметрів точності, зокрема діагностичної сили (DP) для оцінки ефективності моделі. Саме на цьому етапі приймається рішення про адекватність результатів та необхідність повторної класифікації.

Для підтвердження правильності результатів використано статистичні метрики, такі як чутливість (TPR), специфічність (TNR), точність (Accuracy) та діагностична сила (DP).

Ефективність виявлення мін оцінювалася за такими коефіцієнтами виявлення: ймовірність правильного виявлення мін TP та ймовірність помилкової тривоги FP:

$$\mathrm{TP} = \frac{|\mathrm{M}|}{|\mathrm{M}_0|}, \quad (1)$$

$$\mathrm{FP} = \frac{|\mathrm{N}|}{|\mathrm{M}|+|\mathrm{N}|}, \quad (2)$$

де M_0 – множина фактично існуючих мін, M – множина правильно виявлених мін, N – множина помилкових виявлень; |M| – загальна кількість елементів у множині M.

Діагностична сила – це здатність методу ідентифікувати досліджувані об'єкти за певною ознакою. Цей параметр розраховується за формулою 3.

DP = np.log((TP + 1e-10) / (FN + 1e-10)) +
+np.log((TN + 1e-10) / (FP + 1e-10)), (3)

де DP – діагностична сила, TP – істинно позитивні результати ідентифікації; FN – хибно негативні результати; TN – істинно негативні результати; FP – хибно позитивні результати. Слід зауважити, що різні канали та набори даних мають різну діагностичну силу. Розрахунок діагностичної сили ідентифікації мін за різними спектральними каналами наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Діагностична сила ідентифікації мін за спектральними каналами

Канали	Діагностична сила (DP)
Кольорове зображення (RGB)	19,31
Синій (B): 450 нм ± 16 нм	72,37
Зелений (G): 560 нм ± 16 нм	73,73
Червоний (R): 650 нм ± 16 нм	72,47
Червоний край (RE): 730 нм ± 16 нм	73,63
Ближній інфрачервоний діапазон (NIR): 840 нм ± 26 нм	73,53

Для програмування задачі використано менеджер пакетів Python, PIP та такі бібліотеки: 'cv2' (бібліотека OpenCV для обробки зображень); 'numpy': (бібліотека для роботи з масивами та математичними операціями); 'LogisticRegression': класифікатор логістичної регресії з бібліотеки Scikit-learn; 'matplotlib.pyplot': бібліотека для побудови графіків.

Використано функції: 'preprocess_images' для попередньої обробки, 'create_and_save_image_mosaic' – для створення мозаїки зображень та збереження її у файл; 'smooth_image_mosaic' – для згладжування мозаїки; 'prepare_training_data' – для підготовлення навчальних даних, яка перетворює згладжену мозаїку зображень у одновимірний масив пікселів та повертає підготовані дані; 'train_logistic_regression' – для формування функції правдоподібності та оптимізації параметрів моделі логістичної регресії, навчання її на навчальних даних та повертання навченої моделі; 'classify_pixels' – для класифікації пікселів мозаїки зображень мін (перетворює мозаїку в одновимірний масив пікселів; обчислює

ймовірності належності до класу мін; повертає масив імовірностей у вигляді мозаїки); 'obtain_labels_from_image', яка отримує мітки зображення, конвертує зображення у відтінки сірого, позначає пікселі, які мають яскравість, меншу від порогового значення, як мітки класу 1, а решту – як мітки класу 0; повертає мітки у вигляді одновимірного масиву; 'save_labels_as_image', яка перетворює масив міток у зображення та зберігає зображення у форматі TIFF та масив міток у файл NPY.

Головна функція 'main' виконує послідовно всі кроки обробки аерофотознімків для виявлення мін, включаючи попередню обробку зображень, створення мозаїки, згладжування зображень, навчання моделі, класифікацію пікселів, обчислення діагностичної сили та побудову графіку.

Результати

У процесі виявлення мін на багатоспектральних знімках розглянуто три різні варіанти зйомки (з різною кількістю та типами мін). Загальною метою у всіх представлених варіантах наборів даних було завдання ефективно виявляти міни на основі обробки багатоспектральних зображень. Розраховано діагностичну силу (формула 3) ідентифікації мін за різними наборами даних (табл. 2). На рис. 2 показано фрагмент зйомки території із закопаними мінами – ТМ-62ПЗ; мінами, прихованими в траві: МОН-50, МОН-90, МОН-100; відкриті наземні міни – ОЗМ-72, ТМ-62М, ТМ-72 та ТМ-62ПЗ.

Таблиця 2

Діагностична сила ідентифікації мін за наборами даних

Набір даних	Діагностична сила (DP)
Кольорове зображення (RGB)	19,31
Три канали в діапазоні (від 450 нм до 650 нм)	73,53
Червоний канал (650 нм ± 16 нм)	72,47
Канал у діапазоні від 730 нм до 840 нм + кольорове зображення (RGB)	22,35
Інфрачервоне зображення з камери FLIR One Pro	44,68
Soil Water Index – SWI	71,41

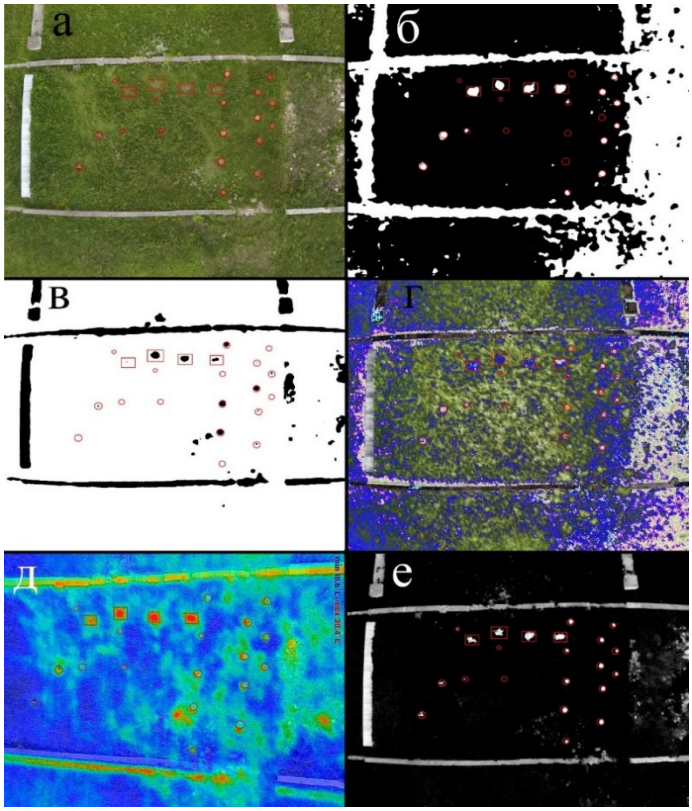


Рис. 2. Порівняння можливості ідентифікації мін на багатоспектральних знімках:
а – кольорове зображення ділянки (RGB); б – три канали в діапазоні (від 450 нм до 650 нм);
в – червоний канал (650 нм ± 16 нм); г – два канали в діапазоні (від 730 нм до 840 нм + кольорове зображення (RGB));
д – інфрачервоне зображення з камери FLIR One Pro;
е – результат опрацювання масиву даних за допомогою запропонованого алгоритму

Ідентифікація мін за кольоровим зображенням ділянки (рис. 2а) показала низьку ефективність (діагностична сила 19,31).

Комбінація трьох каналів (рис. 2б) синього (450 нм±16 нм), зеленого (560нм±16 нм) та червоного каналів (650 нм±16 нм) дала змогу більш успішно ідентифікувати контраст між мінами і навколишнім середовищем та показало діагностичну силу 73,53.

Використання інфрачервоних зображень при виявленні мін за рахунок більшої інформації про теплове випромінювання об'єктів показало діагностичну силу 44,68.

З усіх проаналізованих для ідентифікації мін наборів даних заслуговує на увагу можливість використання індексу вологості ґрунту (SWI – Soil Water Index), що має високу діагностичну силу. Цей індекс дозволяє визначити вміст вологи в ґрунті (рис. 3). Цифрами на рисунку

показано значення SWI. Знімання на ділянці проводилось вранці (початок робіт о 10:33). Значення індексу SWI в місці розміщення мін лежать у діапазоні від –0,15 до –0,28. Це свідчить про те, що ділянки, де зосереджені міни, є більш вологими (можливо, за рахунок конденсації) на відміну від загальної вологості ґрунту від 0,75 до –0,12. Частина досліджуваної ділянки на сході є більш водонасиченою, значення SWI на ній перевищують значення, характерні для мін, і лежать у діапазоні від –0,31 до –0,78.

$$SWI=NIR-SWIR/NIR+SWIR, \quad (4)$$

де NIR − ближній інфрачервоний канал; SWIR – короткохвильовий інфрачервоний канал.

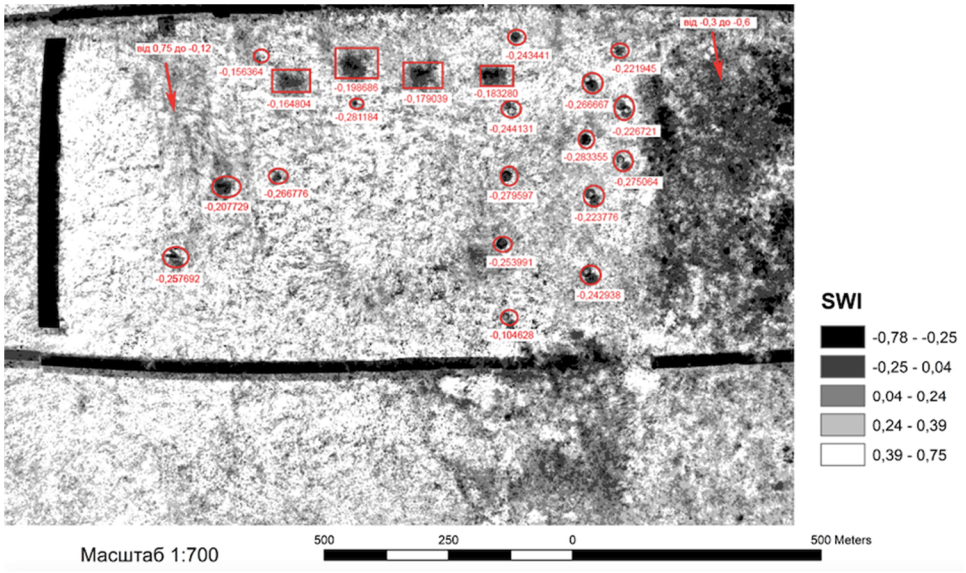


Рис. 3. Результати ідентифікації мін за індексом вологості ґрунту (SWI)

В результаті застосування алгоритму на геозображеннях визначається положення мін у графічному вигляді, що може бути оперативно передано на мобільні пристрої зацікавленим сторонам для перегляду та роботи з картами через відповідний інтерфейс користувача.

Дискусія і висновки

Використання даних, отриманих з легких БПЛА коптерного типу DJI і Parrot багатоспектральними цифровими камерами P12.4K із сенсорами видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів P4MS і теплової інфрачервоної камери FLIR One Pro, показало певну ефективність для виявлення мін. Алгоритм апробовано на наборах даних з тестового полігона зі встановленими муляжами мін, що зробило можливим верифікацію розпізнавання мін. Програмування задачі виконано мовою Python з використанням бібліотек OpenCV, numpy, LogisticRegression, Scikit-learn, matplotlib.pyplot.

Підтверджено ефективність ідентифікації мін на основі оброблення багатоспектральних зображень, зокрема використання індексу вологості ґрунту (SWI – Soil Water Index). Це пов'язано з тим, що в околі міни концентрується більша кількість вологи внаслідок конденсації вологи на поверхні міни внаслідок добової зміни температур та порушенням природних шляхів просочування вологи вниз уздовж профілю ґрунту. Діагностична сила використання зображень різних каналів для виявлення мін становила близько 70 %, що недостатньо для однозначної ідентифікації вибухонебезпечних предметів. Це серйозно обмежує можливості використання методу для гуманітарного розмінування, військових операцій, цивільної безпеки.

Вважаємо, що для продовження досліджень з ідентифікації мін корисним буде створення бази знань різних типів мін, а також порушень, які вони спричинюють у різних типах ландшафтів на базі зафіксованих під час знімань сигнатур.

Внесок авторів: Дмитро Ляшенко – концептуалізація, методологія, написання (редагування); Іванна Зобнів – написання (оригінальна чернетка), формальний аналіз, програмне забезпечення; Олександр Цвик – методологія, написання тексту, валідація даних.

Подяки, джерела фінансування. Дослідження виконувалися на основі даних, наданих Науковим центром аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук. Автори вдячні за надану можливість користуватися архівними матеріалами аерофотознімання особисто Станкевичу Сергію Арсенійовичу.

Список використаних джерел

Денисик, Г., & Антонюк, О. (2017). Наукове і прикладне значення дослідження белігеративних ландшафтів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 1, 13–16.

Денисик, Г. І. (2013). Антропогенне ландшафтознавство у першій половині XXI століття. *Наукові записки. Серія: Географія : зб. наук. пр. Вінниц. держ. пед. ун-т ім. М. Коцюбинського*, 25, 7–12.

Довгий, С., Лялько, В., Бабійчук, С., Кучма, Т., Томченко, О., & Юрків, Л. (2019). *Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування*.

Горбулін, В. П. (2022). Світова глобальна проблема розмінування: український вектор. *Вісник НАН України*, 2, 3–13.

Довбня, М. (2024). Порівняльний аналіз дронів для розмінування українських територій.

Кабінет Міністрів України. (2024, 28 червня). *Про схвалення Національної стратегії протимінної діяльності на період до 2033 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках*. Розпорядження № 616-р. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/616-2024-р#Text

Стецюк, В., & Ковальчук, І. (2019). Белігеративні властивості рельєфу. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*, 2(35), 29–32. https://doi.org/10.17721/1728-2217.2016.35.29-32

Alqudsi, Y. S., Alsharafi, A. S., & Mohamed, A. (2021, July). A review of airborne landmine detection technologies: Unmanned aerial vehicle-based approach. In *2021 International congress of advanced technology and engineering (ICOTEN)* (pp. 1–5). IEEE.

Baghbadorani, A. A., Holbrook, S., Martin, E. R., Ripepi, N. S., & Libbey, B. (2022). Radar Imaging Applications for Mining and Landmine Detection.

Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*, 12(5), 859.

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Shvaiko, V., & Bonchkovskyi, A. (2023, November). A Comprehensive Methodological Approach to Assessing War-Induced Soil Disturbances in the Kharkiv Region, Ukraine. In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Deans, J., Gerhard, J., & Carter, L. J. (2006). Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface. *Infrared Physics & Technology*, 48(3), 202–216. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.06.003

Elbakary, M. I., & Alam, M. S. (2008, March). Mine detection in multispectral imagery data using constrained energy minimization. In *Optical Pattern Recognition XIX* (Vol. 6977, pp. 63–71). SPIE.

Fernández, M. G., López, Y. Á., Arboleya, A. A., Valdés, B. G., Vaqueiro, Y. R., Andrés, F. L. H., & García, A. P. (2018). Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 6, 45100–45112.

Hupy, J. (2008). The environmental footprint of war. *Environment and History*, 14(3), 405–421.

Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., & Abd El-Samie, F. E. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. *Sensing and Imaging: An International Journal*, 11, 89–112.

Lamorski, K., Pręgowski, P., Swiderski, W., Szabra, D., Walczak, R. T., & Usowicz, B. (2002). Thermal signatures of land mines buried in mineral and organic soils–modelling and experiments. *Infrared physics & technology*, 43(3–5), 303–309.

Miller, T. W., Borchers, B., Hendrickx, J. M., Hong, S., Dekker, L. W., & Ritsema, C. J. (2002, April). Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection. In *Fifth international symposium on technology and the mine problem* (pp. 1–10).

Popov, M. O., Stankevich, S. A., Moso, S. P., Titarenko, O. V., Dugin, S. S., Golubov, S. I., & Andreiev, A. A. (2022). Method for Minefields Mapping by Imagery from Unmanned Aerial Vehicle. *Advances in Military Technology*, 17(2), 211–229.

References

Alqudsi, Y. S., Alsharafi, A. S., & Mohamed, A. (2021, July). A review of airborne landmine detection technologies: Unmanned aerial vehicle-based approach. In *2021 International congress of advanced technology and engineering (ICOTEN)* (pp. 1–5). IEEE.

Baghbadorani, A. A., Holbrook, S., Martin, E. R., Ripepi, N. S., & Libbey, B. (2022). *Radar Imaging Applications for Mining and Landmine Detection*.

Baur, J., Steinberg, G., Nikulin, A., Chiu, K., & de Smet, T. S. (2020). Applying deep learning to automate UAV-based detection of scatterable landmines. *Remote Sensing*, 12(5), 859.

Bonchkovskyi, O., Ostapenko, P., Shvaiko, V., & Bonchkovskyi, A. (2023, November). A Comprehensive Methodological Approach to Assessing War-Induced Soil Disturbances in the Kharkiv Region, Ukraine. In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers.

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024, June 28). On approval of the National Mine Action Strategy for the period until 2033 and approval of the operational plan of measures for its implementation in 2024–2026. Order No. 616-p. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/616-2024-p#Text

Deans, J., Gerhard, J., & Carter, L. J. (2006). Analysis of a thermal imaging method for landmine detection, using infrared heating of the sand surface. *Infrared Physics & Technology*, 48(3), 202–216. https://doi.org/10.1016/j.infrared.2005.06.003

Dovbnia, M. (2024). *Comparative analysis of drones for demining Ukrainian territories* [in Ukrainian].

Dovhii, S., Lyalko, V., Babiychuk, S., Kuchma, T., Tomchenko, O., & Yurkiv, L. (2019). *Fundamentals of remote sensing of the Earth: history and practical application* [in Ukrainian].

Elbakary, M. I., & Alam, M. S. (2008, March). Mine detection in multispectral imagery data using constrained energy minimization. In *Optical Pattern Recognition XIX* (Vol. 6977, pp. 63–71). SPIE.

Fernández, M. G., López, Y. Á., Arboleya, A. A., Valdés, B. G., Vaqueiro, Y. R., Andrés, F. L. H., & García, A. P. (2018). Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *IEEE Access*, 6, 45100–45112.

Horbulin, V. P. (2022). The global problem of demining: the Ukrainian vector. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine,* 2, 3–13 [in Ukrainian].

Hupy, J. (2008). The environmental footprint of war. *Environment and History*, 14(3), 405–421.

Kasban, H., Zahran, O., Elaraby, S. M., El-Kordy, M., & Abd El-Samie, F. E. (2010). A comparative study of landmine detection techniques. *Sensing and Imaging: An International Journal*, 11, 89–112.

Lamorski, K., Pręgowski, P., Swiderski, W., Szabra, D., Walczak, R. T., & Usowicz, B. (2002). Thermal signatures of land mines buried in mineral and organic soils–modelling and experiments. *Infrared physics & technology*, 43(3–5), 303–309.

Miller, T. W., Borchers, B., Hendrickx, J. M., Hong, S., Dekker, L. W., & Ritsema, C. J. (2002, April). Effects of soil physical properties on GPR for landmine detection. In *Fifth international symposium on technology and the mine problem* (pp. 1–10).

Popov, M. O., Stankevich, S. A., Moso, S. P., Titarenko, O. V., Dugin, S. S., Golubov, S. I., & Andreiev, A. A. (2022). Method for Minefields Mapping by Imagery from Unmanned Aerial Vehicle. *Advances in Military Technology*, 17(2), 211–229 [in Ukrainian].

Stetsiuk, V., & Kovalchuk, I. (2019). Beligerative properties of the relief. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Military Specialized Sciences*, 2(35), 29–32. https://doi.org/10.17721/1728-2217.2016.35.29-32 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 30.12.24
Прорецензовано / Revised: 06.02.25
Схвалено до друку / Accepted: 12.03.25

Dmytro LIASHENKO, DSc (Geog.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-5588-0322
e-mail: uageog@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Ivanna ZOBNIV, Student
ORCID ID: 0000-0003-0365-4547
e-mail: ivannazobniv333@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Oleksandr TSVYK, PhD Student
ORCID ID: 0009-0006-5464-2078
e-mail: comtsvik1603@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

MAPPING MINE RISK USING LARGE-SCALE MULTISPECTRAL IMAGERY

Background. ***The full-scale armed aggression against Ukraine has resulted in significant changes in natural and anthropogenic landscapes. This negatively affects the safety of the population and the development of the country's economy. Mines, unexploded ordnance and other explosive objects pose an extraordinary threat. To identify mines, we analyzed the possibility of using spectral images obtained from UAVs for mapping.***

Methods. ***For the mapping tasks, high-resolution images of test images of the test site located in Khmelnytsky region (Ukraine) with dummy mines placed on the surface and at a shallow depth were used. Data processing was performed in ArcGIS PRO, using Python programming.***

Results. ***The article compares the methods of remote mine identification by different sensors according to the literature. A methodology for decoding high spatial resolution geo-images obtained from UAVs in the visible and thermal ranges of the spectrum to detect mines in open areas for humanitarian demining was tested. The image processing algorithm for mine detection, analysis and interpretation of the results using the Python language was further developed.***

Conclusions. ***The comparative analysis and experimental work emphasize the effectiveness of using multispectral images, in particular, the Soil Water Index (SWI) calculated on their basis, for mine identification on multispectral images obtained from UAVs. The use of SWI provides an accuracy of mine identification of only about 70 % and can be used only for preliminary assessment of the contamination of territories by explosive objects.***

Keywords: ***humanitarian demining, UAVs, remote sensing, vegetation indices, decoding, automation, mapping.***

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.

ISSN 1728-3817

Наукове видання

ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 1(108)

Відповідальний за випуск Олександр Меньшов
Chief publication manager Oleksandr Menshov

Комп'ютерна обробка статей Надія Тринос
Computer processing of the articles by Nadiya Trinos

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$^{1/8}$. Обл.-вид. арк. 13,43. Ум. друк. арк. 12,7. Наклад 300. Зам. № 225-11291.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 28.02.25

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