ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

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

ГЕОЛОГІЯ **2(113)/2026**

Засновано 1958 року

УДК 504+550+551+552+624
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113

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., член-кор. НАН України (Україна)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Албані Абдер Ель, д-р філософії, проф. (Франція)**; Аппель Ервін, д-р геол. наук, проф.** (Німеччина)**; Бахмутов Володимир, д-р геол. наук, проф., член-кор. НАН України** (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)**; 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)**; Кошляков Олексій, д-р геол. наук, проф.** (Україна)**; Курило Марія, д-р геол. наук, доц.** (Україна)**; Лісний Георгій, д-р геол. наук, доц.** (Україна)**; Ляшенко Дмитро, д-р. геогр. наук, доц.** (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)**; Мірончук Тетяна, канд. філол. наук, доц.** (Україна)**; Нестеровський Віктор, д-р геол. наук, проф.** (Україна)**; Никитюк Олександр, д-р с.-г. наук, проф., чл.-кор. НААН України** (Україна)**; Огар Віктор, д-р геол. наук, проф.** (Україна)**; Олівія Марк, д-р філософії, проф.** (Португалія)**; Орлюк Михайло, д-р геол. наук, проф., член-кор. НАН України** (Україна)**; Пастушенко Тетяна, канд. філол. наук, доц.**(Україна)**; Перейра Пауло, д-р філософії, проф.** (Литва)**; Портнов Василь, д-р філософії, проф.** (Казахстан)**; Ромащенко Михайло, д-р техн. наук, проф., акад. НААН України** (Україна)**; Спассов Сімо, д-р філософії, проф.** (Бельгія)**; Стародуб Юрій, д-р фіз.-мат. наук, проф.** (Україна)**; Тонха Оксана, д-р с.-г. наук, проф.** (Україна)**; Шабатура Олександр, д-р геол. наук, доц. (заст. голов. ред.)** (Україна)**; Шевченко Олексій, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.** (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"
13.05.26 (протокол № 12)

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 (квартиль 4, SJR 0.197), Web of Science (квартиль 4, імпакт фактор 0.3), EBSCO, Academic Resource Index ResearchBib, Google Scholar

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", 2026

Матеріал поширюється за ліцензією Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

BULLETIN

TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

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

GEOLOGY **2(113)/2026**

Established in 1958

UDC 504+550+551+552+624
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113

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., Corresponding Member of the NAS of Ukraine** (Ukraine)
EDITORIAL BOARD	**Albani Abderrazak El, PhD, Prof.** (France); **Appel Erwin, Prof. DSc (Geol.)** (Germany); **Bakhmutov Volodymyr, DSc (Geol.), Prof., Corresponding Member of the NAS of Ukraine** (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); **Koroneos Antonis, PhD, Prof.** (Greece); **Koshliakov Oleksiy, DSc (Geol.), Prof.** (Ukraine); **Kurylo Mariia, DSc (Geol.), Assoc. Prof.** (Ukraine); **Liashenko Dmytro, DSc (Geog.), Assoc. Prof.** (Ukraine); **Lisny Georhii, DSc (Geol.), Assoc. Prof.** (Ukraine); **Maslov Borys, DSc (Phys. & Math.), Prof.** (Ukraine); **Menshov Oleksandr, DSc (Geol.), Senior Researcher (Executive Editor)** (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); **Nykytiuk Oleksandr, DSc (Agricultural Sciences), Prof., Corresponding Member of the NAAS of Ukraine** (Ukraine); **Ogar Viktor, DSc (Geol.), Prof.** (Ukraine); **Olivia Marc, PhD, Prof.** (Portugal); **Orliuk Mykhailo, DSc (Geol.), Prof., Corresponding Member of the NAS of Ukraine** (Ukraine); **Pastushenko Tatyana, PhD (Philol.), Assoc. Prof.** (Ukraine); **Pereira Paulo, PhD, Prof.** (Lithuania); **Portnov Vasyl, PhD, Prof.** (Kazakhstan); **Romashchenko Myhailo, DSc (Engin.), Prof., Active Member of the NAAS of Ukraine** (Ukraine); **Schmidt Volkmar, PhD, Prof.** (Germany); **Shabatura Oleksandr, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Deputy Editor-in-Chief)** (Ukraine); **Shevchenko Oleksiy, DSc (Geol.), Senior Researcher** (Ukraine); **Shnyukov Sergiy, DSc (Geol.), Assoc. Prof.** (Ukraine); **Spassov Simo, PhD, Prof.** (Belgium); **Yurii Starodub, DSc (Phys. & Math.), Prof.** (Ukraine); **Tonkha Oksana, DSc (Agr.), 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)

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"** **13.05.26(protocol № 13)**
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 (Quartile 4, SJR 0.197), Web of Science (Quartile 4, Impact Factor 0.3), EBSCO, Academic Resource Index ResearchBib, Google Scholar**
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", 2026

The material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

ЗМІСТ

ГЕОФІЗИКА

ВИЖВА Сергій, ОНИЩУК Віктор, ГАФИЧ Іван, ОНИЩУК Іван, РЕВА Микола, ШАБАТУРА Олександр
Встановлення аналітичної залежності потоку нафти від температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов 5

АХМЕДОВ Тофік, АСАДЛИ Амікіші, ТАШВІКІ Гойчек
Прогнозування зон аномально високого пластового тиску з використанням даних 3D-сейсмічної інверсії 17

КАРПЕНКО Олексій, ВІРШИЛО Іван
Розподіл температурного поля в свердловині та гірських породах після завершення каротажу 26

ПІГУЛЕВСЬКИЙ Петро
Петрофізичні властивості порід Томаківського гравітаційного максимуму 33

ГЛАВАЦЬКИЙ Дмитро, ЯКУХНО Віктор
Петромагнітні дослідження пісків і піщаних ґрунтів Київського Полісся 44

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

БУРЛУЦЬКИЙ Микола
Германій у бурому вугіллі. Еволюція екологічно безпечних технологій його вилучення 50

ГЕОЛОГІЯ НАФТИ І ГАЗУ

АБДУЛЛА Раванд Длшад
Реагувальні піни, стабілізовані наночастинками, для контролю відповідності у високотемпературних резервуарах 57

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

АБДУЛРАЗАГОВА Парвана
Інтеграція геохімічних даних для виявлення реакцій підземних вод на геодинамічні процеси: дослідження на прикладі Азербайджану 65

КАРІМОВ Вагіф, ШАХБАЗОВ Руфет
Оцінка впливу глобальної зміни клімату на річкові водні ресурси та моделювання регулювання водоспоживання 71

КОШЛЯКОВ Олексій, ДИНЯК Оксана, КОШЛЯКОВА Ірина
Сучасні підходи до моделювання геофільтрації на урбанізованих територіях 78

ТЕЙМУРОВ Мовлуд, ДЖАБРАЙЛОВ Еміль, ГАДЖИЄВА Афаг
Вплив покриву землі та геологічної структури на природне регулювання річкового стоку 83

ГЕОІНФОРМАТИКА

ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій, ВОРОХ Віктор, НІКОЛАЄНКО Олександр, ПАСТУШЕНКО Тетяна, СЮЙВА Ірина
ГІС-моделювання просторово-деталізованого руху сільськогосподарської техніки в задачах прецизійного землеробства 92

КИСЛИЙ Роман
Порівняльний огляд реалізації INSPIRE-порталів та національних інфраструктур геопросторових даних 101

ГЛАЗУНОВА Олена, БОЛБОТ Ігор, РУДЕНСЬКИЙ Роман, КРАВЧЕНКО Володимир, ЦИГАНОВ Олексій, ТОНХА Оксана
Застосування штучного інтелекту для детекції вирв на територіях, пошкоджених військовими діями 114

CONTENTS

GEOPHYSICS

VYZHVA Serhii, ONYSHCHUK Viktor, GAFICH Ivan, ONYSHCHUK Ivan, REVA Mykola, SHABATURA Oleksandr
Determination of analytical dependence of oil flow on temperature and pressure in physical modeling of reservoir conditions 5

AKHMEDOV Tofik, ASADLI Amikishi, TASHVIQI Goychek
Prediction of abnormally high formation pressure zones using 3D seismic inversion data 17

KARPENKO Oleksii, VIRSHYLO Ivan
Distribution of the temperature field in a wellbore and surrounding rocks after completion of logging 26

PIGULEVSKIY Petro
Petrophysical qualities of rocks within the Tomakiv gravity maximum 33

HLAVATSKYI Dmytro, YAKUKHNO Viktor
Rock magnetic study of Kyiv Polissia sands and sandy soils 44

MINERAL RESOURCES

BURLUTSKYY Mykola
Germanium in lignite: the evolution of environmentally safe extraction technologies 50

PETROLEUM GEOLOGY

ABDULLA Rawand Dlshad
Responsive nanoparticle-stabilized foams for conformance control in high-temperature reservoirs 57

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

ABDULRAZAGOVA Parvana
Integration of geochemical data for detecting groundwater responses to geodynamic processes: a case study from Azerbaijan 65

KARIMOV Vagif, SHAHBAZOV Rufat
Assessment of the impact of global climate change on river water resources and modeling of water consumption regulation 71

KOSHLIAKOV Oleksii, DYNIAK Oksana, KOSHLIAKOVA Iryna
Current approaches to modeling geofiltration in urban areas 78

TEYMUROV Movlud, JABRAYILOV Emil, HAJIYEVA Afag
The influence of land cover and geological structure on the natural regulation of river runoff 83

GEOINFORMATICS

ZATSERKOVNYI Vitaliy, VOROKH Victor, NIKOLAIENKO Olexandr, PASTUSHENKO Tetiana, SIUIVA Iryna
GIS-based modeling of spatially explicit agricultural machinery movement in precision agriculture systems 92

KYSLYI Roman
A comparative review of the implementation of INSPIRE portals and national spatial data infrastructures 101

GLAZUNOVA Olena, BOLBOT Ihor, RUDENSKYI Roman, KRAVCHENKO Volodymyr, TSYGANOV Oleksii, TONKHA Oksana
Application of Artificial Intelligence for Crater Detection in Areas Affected by Military Actions 114

Стаття та будь-який пов'язаний з нею опублікований матеріал поширюється за ліцензією Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).
The article and any related published material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

УДК 550.8.056
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.01

Сергій ВИЖВА[1], д-р геол. наук, проф., член-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Віктор ОНИЩУК[1], канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-2301-2202
e-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua

Іван ГАФИЧ[2], канд. геол.-мінерал. наук
ORCID ID: 0009-0001-3219-5143
e-mail: gafichip@dtek.com

Іван ОНИЩУК[1], канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0009-0004-0186-7578
e-mail: ivan.onyshchuk@knu.ua

Микола РЕВА[1], канд. фіз.-мат. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0009-1307-7617
e-mail: mvreva@gmail.com

Олександр ШАБАТУРА[1], д-р геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-0810-3701
e-mail: oshabatura@knu.ua

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]ДТЕК Нафтогаз, Київ, Україна

ВСТАНОВЛЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОТОКУ НАФТИ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ І ТИСКУ ПРИ ФІЗИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ПЛАСТОВИХ УМОВ

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

Вступ. ***Висвітлено результати фізичного моделювання протікання нафти через породу-колектор. Мета досліджень полягала у встановленні аналітичної залежності потоку нафти від пластової температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов.***

Методи. ***Для експериментальних лабораторних досліджень з фізичного моделювання процесу протікання нафти через гірську породу використовувалась спеціальна лабораторна установка високого тиску ВСЦ-1000М. Теоретичні розрахунки зі встановлення аналітичної залежності потоку нафти від пластової температури і тиску виконувались із застосуванням методів кореляційного аналізу.***

Результати. ***Наведено результати експериментальних лабораторних досліджень потоку в різних PT-умовах. Встановлено аналітичну залежність потоку нафти від пластової температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов. Виконано порівняння експериментальних лабораторних даних з розрахунковими за допомогою аналітичної залежності.***

Висновки. ***Значення потоків нафти, розраховані за допомогою аналітичної залежності, повністю збіжні зі значеннями поліномів 4-го порядку, якими апроксимуються експериментально виміряні потоки залежно від температур за фіксованих перепадів тиску на торцях зразка 16–36 бар. Також повністю збіжні розраховані потоки з потоками, виміряними за різних перепадів тиску при постійних температурах. Ці залежності можуть бути використані при інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні величин фільтраційно-ємнісних параметрів порід-колекторів.***

Ключові слова: ***температура, тиск, фізичне моделювання пластових умов, фільтраційно-ємнісні параметри, аналітичні залежності.***

Вступ

Постановка проблеми. Зважаючи на ситуацію з енергоносіями у світі, проблема пошуків та вивчення як традиційних (Карпенко та ін., 2014; Соболь, & Карпенко, 2021), так і нетрадиційних джерел вуглеводнів (Iuras et al., 2023; Михайлов та ін., 2014) є надзвичайно актуальною для України. Дослідження петрофізичних властивостей гірських порід з метою оцінки перспективності геологічних структур і комплексів на вуглеводні є актуальним. Петрофізичні властивості порід необхідні при інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин, а також для оцінки параметрів гідророзриву пласта.

Лабораторні геофізичні та петрофізичні дослідження порід-колекторів, що вміщують вуглеводні, відіграють важливу роль для розуміння процесів міграції і накопичення вуглеводнів і є основою для математичного моделювання родовища, визначення їх перспективності, вибору способів і методики їх промислової розробки тощо (Orlyuk et al., 2018, 2021; Орлюк, & Друкаренко, 2013, 2018; Орлюк, & Пашкевич, 2011; Пашкевич та ін., 2014).

Важливою частиною петрофізичних досліджень є *фізичне моделювання пластових умов*, коли в лабораторній установці створюються умови, максимально наближені до реального стану гірських порід і флюїдів

© Вижва Сергій, Онищук Віктор, Гафич Іван, Онищук Іван, Рева Микола, Шабатура Олександр, 2026

(нафти, газу, води) на великій глибині. Зокрема, пластовий тиск створюється шляхом нагнітання флюїдів у пори зразка (керна); літостатичний (ефективний) прикладається до зразка через гумову манжету в кернотримачі; температура підтримується за допомогою термостатів, а фізико-хімічні властивості модельного розчину задаються підбором в'язкості та густини.

У статті висвітлено теоретичне обґрунтування встановлення аналітичної залежності потоку нафти в зразках порід від пластової температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов та порівняння цих розрахунків з даними лабораторного експерименту.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Лабораторні визначення петрофізичних параметрів порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень, а отже їм приділяється значна увага. На сучасному зрізі експериментальної петрофізики можна чітко виокремити дві групи підходів. Перший, традиційний, використовує фізичну парадигму розуміння процесів міграції флюїдів у гетерогенному середовищу. Інша група методів орієнтована на створення швидких математичних "калькуляторів" властивостей флюїду, обходячи необхідність проведення реальних PVT-досліджень.

Зазначаємо домінування китайських дослідників саме у вузькій ніші фізичного моделювання *tight oil*, HPHT-умов та нелінійного потоку (non-Darcy flow) (Pengxiang et al., 2018; Wang et al., 2020), що пояснюється об'єктивними факторами. Левова частка внутрішніх запасів нафти в Китаї (басейни Ордос, Сунляо, Джунгар, Тарім) – це глибокозалеглі, екстремально низькопроникні та сланцеві колектори з високими пластовими температурами та тисками, для яких класичні закони Дарсі просто не працюють. Тому вивчення початкового градієнта тиску (TPG) та мікрофільтрації для Китаю є питанням національної енергетичної безпеки. Китайські державні корпорації (CNPC, Sinopec, CNOOC) спільно з профільними університетами (наприклад, China University of Petroleum, Southwest Petroleum University) інвестують величезні кошти у створення передових апаратних комплексів. Вони масово проводять дорогі та тривалі фізичні експерименти на кернах. Північна Америка (США та Канада), яка також є лідером у видобутку нафти з низькопроникних порід (сланцева революція), має дещо інший науковий фокус. Їхні вчені частіше публікують роботи з геомеханіки та технологій багатостадійного гідророзриву пласта; математичного моделювання на рівні всього родовища та аналізу кривих падіння видобутку. Останніми роками у них фокус сильно змістився на уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) та геотермальну енергетику.

Стосовно українського досвіду, то системний підхід до вивчення колекторів України, особливо ущільнених порід Дніпровсько-Донецької западини та Львівського палеозойського прогину (Вижва та ін., 2024; Михайлов та ін., 2014; Рибалка, & Карпенко, 2016, 2025*),* виконаний авторами дослідження, дає змогу аргументовано стверджувати про кілька важливих аспектів сучасного фізичне моделювання, які є критично важливими.

1. Барична деформація матриці та закриття мікротріщин. Для ущільнених порід (алевролітів, низькопористих пісковиків, карбонатів) петрофізичні "атмосферні" вимірювання є нерепрезентативними. При фізичному моделюванні глибокозалеглих колекторів (глибина понад 5000 м) на спеціалізованих установках, здатних відтворювати пластові умови, потік флюїду не можна розглядати ізольовано від деформації матриці породи. Під час моделювання ефективного пластового тиску відбувається механічне закриття мікротріщин, що призводить до різкого падіння пористості (відносне зниження становить від 5 до 25 %). Це означає, що точне відтворення термобаричних умов на спеціалізованих лабораторних установках (на кшталт комплексу ВСЦ-1000М) є абсолютно необхідною умовою для коректного визначення динаміки потоку (Вижва та ін., 2019, 2020, 2021, 2022а, 2022б). Експерименти з високонапірного нагнітання доводять, що динаміка потоку є нелінійною: лише за певних, експериментально підібраних швидкостей інжекції, енергія потоку ініціює розкриття нових мікротріщин. Важливо також враховувати геомеханічний зв'язок у фізичному моделюванні, а саме вплив високого тиску на архітектуру порожнин та наявний динамічний зв'язок конфігурації пористого середовища прямо під час експерименту, перетворюючи фільтраційну модель на геомеханічну (Li et al., 2025).

2. "Температурний парадокс" багатофазної фільтрації. Дані комплексного фізичного моделювання доводять, що коефіцієнти дифузії та відносні фазові проникності в системі "газ-рідина" не є сталими (Yang, & Yang, 2025). При фізичному моделюванні потоку нафти за високих температур спостерігається конкуруючий ефект. З одного боку, в'язкість нафти очікувано зменшується (апроксимується степеневою функцією), що мало б полегшити фільтрацію, але з іншого боку, відбувається термічне розширення породотвірних мінералів. Це розширення звужує надкапілярні пори та блокує частину капілярних, перетворюючи їх на субкапілярні (непроникні). Як наслідок, загальний коефіцієнт проникності породи може парадоксально знижуватися зі зростанням температури (Вижва та ін., 2025). Тобто досліджувані параметри є функціями температури та концентрації флюїду, які критично визначають швидкість переміщення межі розділу фаз та загальну швидкість потоку в зоні дренування.

У фізичному моделюванні для виведення аналітичної залежності в'язкості (μ) часто адаптують рівняння типу Арреніуса–Андраде:

$$\mu(T) = Aexp\left(\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

де A – емпіричний коефіцієнт (визначається при моделюванні), E_a – енергія активації в'язкого перебігу, R – універсальна газова стала, T – абсолютна температура пласта.

Сучасне петрофізичне моделювання (Gao et al., 2025) вимагає обов'язкового врахування групового складу флюїду (насичені, ароматичні вуглеводні, смоли та асфальтени). Водночас існують спроби створити напівемпіричні рівняння, що вимагають лише одного базового виміру в'язкості для екстраполяції на різні температури та тиски (MacDonald, & Miadonye, 2017). Головне завдання сучасних публікацій у цій сфері – через фізичне моделювання на кернових установках (coreflooding) або піщаних моделях знайти точні аналітичні вирази для функцій $k_{ro}(P,T)$, $\mu(P,T)$ та $\rho_0(P,T)$, які дають змогу отримати швидкість потоку (вектор дебіту) q_0 із врахування градієнта тиску ΔP та фазової проникності k_{ro}, що динамічно змінюється залежно від тиску і температури (в модифікованому законі Дарсі):

$$q_0 = -\frac{kk_{ro}(P,T)}{\mu(P,T)}(\Delta P - \rho_0(P,T)g) \quad (2)$$

Експерименти показують, що додавання легких вуглеводнів знижує загальну температуру системи, але при цьому оптимізує мобільність нафти за рахунок розчинення, що робить процес міграції більш рентабельним (Esmaeili et al., 2025). Реальний потік у пластових умовах визначається не лише швидкістю фронту витиснення, а й складною взаємодією фаз. Сучасне фізичне

моделювання також активно досліджує поведінку витискувальних агентів, таких як CO_2, піни на масляній основі (Wang et al., 2025).

3. Анізотропія фільтраційних властивостей. При підготовці кернових моделей для симуляції потоку необхідно жорстко контролювати орієнтацію зразків. Фізичне моделювання доводить наявність суттєвої анізотропії фільтраційно-ємнісних властивостей: потік нафти вздовж нашарування осадового матеріалу та вхрест йому характеризується різними швидкостями та градієнтами тиску (Вижва та ін., 2025). Врахування температурно-чутливих відносних фазових проникностей для співнаправлених та протилежно направлених потоків газу і рідини є необхідною умовою для коректного відтворення гідродинаміки витіснення, яку фіксують під час фільтраційних експериментів на кернових моделях (Zargar et al., 2020).

4. В'язкопружна релаксація (в умовах гідророзриву). При моделюванні інтенсифікації потоку (наприклад, для *tight gas* або *tight oil*) породу слід розглядати не просто як пружне, а як в'язкопружне середовище. Під впливом довготривалих напружень мікротріщини, які слугують каналами для потоку флюїду, схильні до поступового закриття через в'язкопружну повзучість породи (Маслов та ін., 2017). Це вимагає проведення довготривалих фільтраційних експериментів для оцінки реального падіння дебіту з часом (Vyzhva et al., 2019).

5. Структура капілярного простору та необхідність інтенсифікації. Капіляриметричні дослідження (методом центрифугування) доводять (Вижва та ін., 2020; 2021; 2022а; 2022б), що в ущільнених породах ДДЗ левова частка (до 98 % в окремих алевролітах) припадає на субкапілярні пори, які є непроникними для нафти. Фізичне моделювання звичайного потоку нафти в таких породах часто призводить до "кольматації" порового простору. Тому цикл моделювання обов'язково повинен включати етап "промивки" зразка хімічними розчинами для інтенсифікації, після чого здійснюється повторне прокачування нафти для оцінки ефективності розчину (Вижва та ін., 2025). У сильно макронеоднорідних (тріщинувато-кавернозних) карбонатових колекторах традиційне витиснення водою є неефективним через прорив агента по тріщинах. Фізичне моделювання доводить, що застосування високого тиску має поєднуватися з модифікацією міжфазного натягу (Li et al., 2025).

Таким чином, сама по собі фізична модель дає лише точкові дані за конкретних умов, тоді як чисельний симулятор без експериментальної бази має високу невизначеність. Сучасний стандарт дослідження вимагає їхньої жорсткої інтеграції: дані фізичного моделювання використовуються для калібрування математичних моделей, що дає змогу масштабувати результати на все родовище та надійно прогнозувати поведінку потоку високов'язкої нафти. Повертаючись до симуляційного підходу в нафтогазовій петрофізиці, відзначимо деякі моменти сучасних тенденцій.

Огляд сучасних публікацій показує, що спрощені математичні моделі, які не спираються на прямі дані фізичного (лабораторного) моделювання, здатні з прийнятною похибкою (близько 9 %) прогнозувати лише загальний кумулятивний видобуток за тривалий час. Проте вони виявляються неспроможними адекватно описати динаміку потоку нафти (дебіт у реальному часі) та геометричний розвиток зони дренування через надмірне спрощення процесів тепло- та масоперенесення (Manfre Jaimes, & Clarke, 2020) або потребують врахування ефекту впливу тріщин (Zong et al, 2024). Тому масово триває залучення в цей дослідницький процес методів і алгоритмів *Machine Learning*. Для цього використовують гігантські масиви історичних даних як у (Tariq, Mahmoud, & Abdulraheem, 2021) або (Awad, El-Sayed, & El-Maksoud, 2022). Проте, на нашу думку, машинне навчання не може замінити реальний експеримент, якщо йдеться про нестандартні EOR-технології або унікальні властивості конкретного родовища. Навіть при використанні величезних баз даних (понад 5000 зразків) і базових штучних нейромереж (ANN) (Gharbi, & Elsharkawy, 2003) було показано, що "сліпі" нейромережі часто ігнорують фізику процесу, тому найкращі результати сьогодні дають гібридні алгоритми: GMDH (Al-Shami et al., 2022), адаптивні нейро-нечіткі системи ANFIS (Awad, El-Sayed, & El-Maksoud, 2022) з обов'язковим *Trend Analysis*, гарантуючи, що модель правильно відображає закони термодинаміки (наприклад, що тиск зростає при збільшенні температури та газовмісту).

Варто згадати про ще один інноваційний напрям стимуляційного моделювання – "цифрова нафта". Замість проведення десятків експериментів у PVT-кернотримачі з різними розчинниками, створюється "цифровий двійник" нафти (Imai, Okajima, & Kanno, 2020). Ця цифрова модель дає змогу *in silico* розрахувати, як конкретні розчинники (від метану до ізомерів ксилолу) впливатимуть на набухання нафти та зменшення її в'язкості. В основу алгоритмів покладено залежності молекулярної динаміки.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Кореляційні зв'язки між фільтраційно-ємнісними параметрами і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Комплекс лабораторних петрофізичних досліджень є основою для визначення цих зв'язків, особливо при фізичному моделюванні пластових умов. Отримані петрофізичні параметри в результаті лабораторних досліджень та їх кореляційні зв'язки із фільтраційно-ємнісними параметрами використовуються для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки і сейсморозвідки, а також з метою розробки нових технологій інтенсифікації видобування вуглеводнів (Горовенко, Венгрович, & Шеремет, 2022).

Слід відзначити, що петрофізичні параметри порід і кореляційні залежності між ними мають досить виражений індивідуальний характер стосовно кожної ділянки досліджень. Тому визначення цих властивостей, особливо при фізичному моделюванні пластових умов, а також встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їх результатів.

Мета досліджень. Метою даних досліджень були теоретичні дослідження зі встановлення аналітичної залежності потоку нафти в зразках порід від пластової температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов.

Об'єкт дослідження. Експериментальні та аналітичні залежності потоку нафти від пластової температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов.

Експериментальні лабораторні та аналітичні дослідження виконано у НДЛ теоретичної і прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка.

Експериментальні дослідження. Достовірне визначення петрофізичних властивостей гірських порід вимагає проведення лабораторних експериментів в умовах, максимально наближених до пластових (Нестеренко, 2010). Це зумовлює необхідність витримки зразків за заданих термобаричних параметрів із забезпеченням можливості синхронного вимірювання комплексу фізичних характеристик. З метою реалізації комплексного

фізичного моделювання пластових умов було спроєктовано спеціалізовану експериментальну установку ВСЦ-1000М, а також розроблено відповідні методичні підходи до проведення досліджень і подальшої інтерпретації отриманих даних.

Створений апаратурний комплекс ВСЦ-1000М є модульною системою, яка об'єднує камери високого тиску, систему газопостачання (балони зі стисненим азотом та вуглекислим газом, редуктори, трубопроводи) та гідравлічну станцію типу ГНС-8Р2Е5. Вимірювальний тракт комплексу включає цифрові датчики тиску та лінійних переміщень, електронні ваги WPS 360/c/2, вимірювач електричного опору С.А.6570, а також ультразвукову установку "Керн-4" для реєстрації швидкостей пружних хвиль. Управління процесом і збір даних здійснюються через блок на базі аналогово-цифрових перетворювачів ИТМ-4, підключений до ПК зі спеціалізованим програмним забезпеченням. Конструкція робочих камер дає змогу досліджувати як стандартні зразки (30×30 мм), так і повнорозмірний керн діаметром до 100 мм. Загальний вигляд апаратного комплексу наведено на рис. 1.

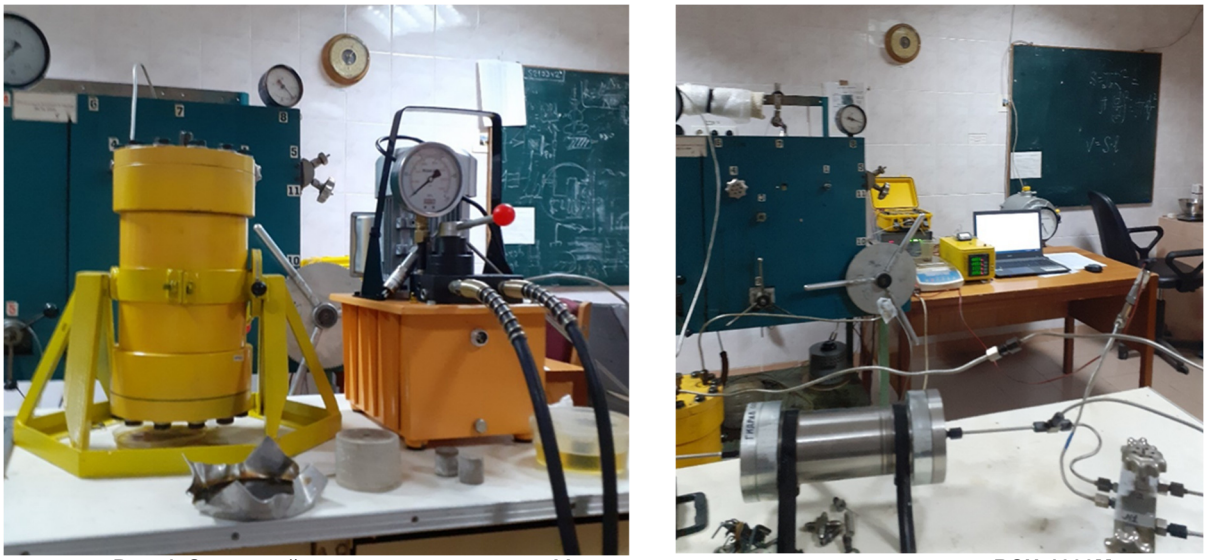


Рис. 1. Загальний вигляд установки для фізичного моделювання пластових умов ВСЦ-1000М

Ключовою науково-технічною перевагою розробленої системи є її мультидисциплінарність. Модульна архітектура, що поєднує оптимальний набір петрофізичного обладнання, дає змогу вирішувати широкий спектр дослідницьких завдань, зокрема:

- оцінку динаміки пористості, питомого електричного опору та швидкостей поширення пружних хвиль залежно від коливань тиску і температури;
- визначення проникності в пластових умовах методами лінійної та радіальної фільтрації у прямому і зворотному напрямках (від центру керна та до нього), що суттєво підвищує точність оцінки цього параметра;
- дослідження процесів насичення кернового матеріалу робочими флюїдами під тиском, а також моделювання процесів витіснення нафти водою;
- вивчення впливу спеціалізованих хімічних реагентів на фільтраційно-ємнісні властивості порід-колекторів;
- фізичне моделювання процесів гідророзриву пласта.

Методика експерименту передбачає проведення вимірювань за строго контрольованих значень температури та тиску (літостатичного, порового на вході та виході). Використання високоточних цифрових датчиків забезпечує автоматизовану реєстрацію показників у режимі реального часу. Дані про термобаричні умови, а також маса профільтрованої рідини (моделі пластової води, нафти тощо), яка фіксується вагами WPS 360/c/2, синхронно транслюються через блок ИТМ-4 у файл формату *.csv* з кроком дискретизації 1 с. Така висока частота запису є критично важливою: вона дає змогу фіксувати швидкоплинні (динамічні) особливості перебігу процесів, що є особливо актуальним при визначенні петрофізичних параметрів ущільнених порід. Паралельно здійснюється реєстрація електричного опору та акустичних характеристик, що формує єдиний комплексний масив експериментальних даних.

За допомогою розробленої установки ВСЦ-1000М виконано низку експериментів з протискування нафти через еталон проникності з метою вивчення залежності її потоку від температури і перепаду тиску на торцях зразка при пластовому тиску 400 бар. Результати цих експериментів слугували для верифікації даних відповідних теоретичних розрахунків.

Коефіцієнт проникності $k_{пр}$ гірських порід є досить важливим петрофізичним параметром, від якого суттєво залежить здатність гірських порід пропускати вуглеводні, а отже дебіт нафтових чи газових експлуатаційних свердловин. Безперечно, що ця характеристика залежить не тільки від петрофізичного складу гірських порід та властивостей флюїду, а й від термобаричних умов, у яких перебуває ця фізична система: температури T та перепаду тиску ΔP.

У лабораторних умовах дослідження проникності різних флюїдів виконують на зразках гірських порід-колекторів шляхом вимірювання потоку флюїду N через зразки. Тому важливо знати аналітичні співвідношення, які дають змогу виконувати оцінку цього параметра за різних значень температури й перепаду тиску. Безперечно, що такі співвідношення можна встановлювати за результатами лабораторних петрофізичних досліджень цього параметра при різних температурах і тисках, застосувавши відповідний регресійний аналіз до експериментальних даних лабораторних вимірювань. Водночас цілком очевидно, що одновимірний регресійний аналіз, спрямований на встановлення залежності потоку від температури за фіксованих значень перепаду тисків $N(T, \Delta P=\text{const})$ або встановлення залежності потоку від

ISSN 1728-3817

перепаду тиску за фіксованих значень температури N(ΔP, T=const)), не є проблемним питанням. Двовимірний регресійний аналіз – отримання аналітичного співвідношення, що дозволяє за результатами петрофізичних досліджень виконувати оцінку потоку за довільних значень температури й перепаду тиску N(T,ΔP), є дещо більш складним завданням. Розглянемо деякі методичні засади, що дають змогу вирішити цю задачу за результатами лабораторних досліджень.

Аналітичні дослідження. Загальноприйнятним і відомим способом багатовимірного регресійного аналізу є застосування оптимізаційних способів, основаних на процедурі мінімізації відхилень експериментальних даних від модельних, розрахованих на основі прийнятої фізико-математичної моделі N(T,ΔP,**a**), де **a** = a_1,a_2,…,a_l – вектор параметрів математичної моделі

$$\delta = \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left[N_{ij} - N(\Delta P_i, T_j, \boldsymbol{a})\right]^2 = \min, \qquad (3)$$

де N_{ij} – елементи масиву значень потоку, визначених за результатом лабораторних вимірювань на зразках гірських порід при різних n температурах і m тисках:

$$\hat{N} = \begin{vmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \dots N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & N_{23} \dots N_{2n} \\ N_{31} & N_{32} & N_{33} \dots N_{3n} \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ N_{m1} & N_{m2} & N_{m3} \dots N_{mn} \end{vmatrix}. \qquad (4)$$

У нашому випадку зазначений оптимізаційний спосіб такого регресійного аналізу не може бути реалізований, оскільки математична модель невідома. Тому необхідно застосувати інший підхід, суть якого розглянемо нижче.

Припустимо, що за результатом одновимірного регресійного аналізу експериментально визначених потоків за різних значень перепаду тиску ΔP при постійних температурах (стовпчики матриці (4)) отримана структурно однакова кореляційна функція F для кожної фіксованої температури T_j:

$$N(\Delta P)|_{T=T_j} = F(\Delta P, \boldsymbol{A}_j), \qquad (5)$$

де $\mathbf{A}_j = A_{j1}, A_{j2}\dots, A_{jl}$ – вектор параметрів функції F для кожної фіксованої температури T_j; l – кількість параметрів функції F.

Цілком очевидно, що вектор параметрів буде залежним від температури T. Тому формула розрахунку потоку N, як функція, що виражає залежність потоку від перепаду тиску й температури, в загальному вираженні матиме такий вигляд:

$$N(\Delta P, T) = F(\Delta P, \boldsymbol{A}(T)), \qquad (6)$$

де $\mathbf{A}(T)$ – вектор функцій, які виражають собою залежність параметрів функції F від температури T. Цю функцію можна знайти шляхом кореляційного аналізу кожної складової вектора параметрів $\mathbf{A}_j$ за їх температурними рядами.

У результаті такого аналізу отримуються регресійні формули температурної залежності кожної складової, а отже і часова залежність самого вектора функцій $\mathbf{A}(T)$:

$$\mathbf{A}(T) = A_1(T, \mathbf{a}_1), A_2(T, \mathbf{a}_2), \dots, A_l(T, \mathbf{a}_l), \qquad (7)$$

де $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, …, $\mathbf{a}_l$ – вектори параметрів відповідних функцій A_1, A_2, …, A_l.

Отримання формули розрахунку потоку за довільних значень температури й тиску можна також починати з одновимірного кореляційного аналізу залежності потоку N від температури T за фіксованих значень перепадів тиску ΔP (рядки матриці (4). У результаті отримується структурно однакова кореляційна функція F для кожного фіксованого перепаду тиску ΔP_i:

$$N(T)|_{\Delta P=\Delta P_i} = F(T, \mathbf{A}_i),$$

де $\mathbf{A}_i = A_{i1}, A_{i2}\dots, A_{ik}$ – вектор параметрів функції F для кожного фіксованого перепаду тиску ΔP_i; k – кількість параметрів функції F.

Отже, формула розрахунку потоку N за довільних значень T й ΔP у загальному вираженні матиме такий вигляд:

$$N(T, \Delta P) = F(T, \boldsymbol{A}(\Delta P)), \qquad (8)$$

де $\mathbf{A}(\Delta P) = A_1(\Delta P, \mathbf{a}_1), A_2(\Delta P, \mathbf{a}_2), \dots, A_k(\Delta P, \mathbf{a}_k)$; $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{a}_2$, …, $\mathbf{a}_k$ – вектори параметрів відповідних функцій A_1, A_2, …, A_k.

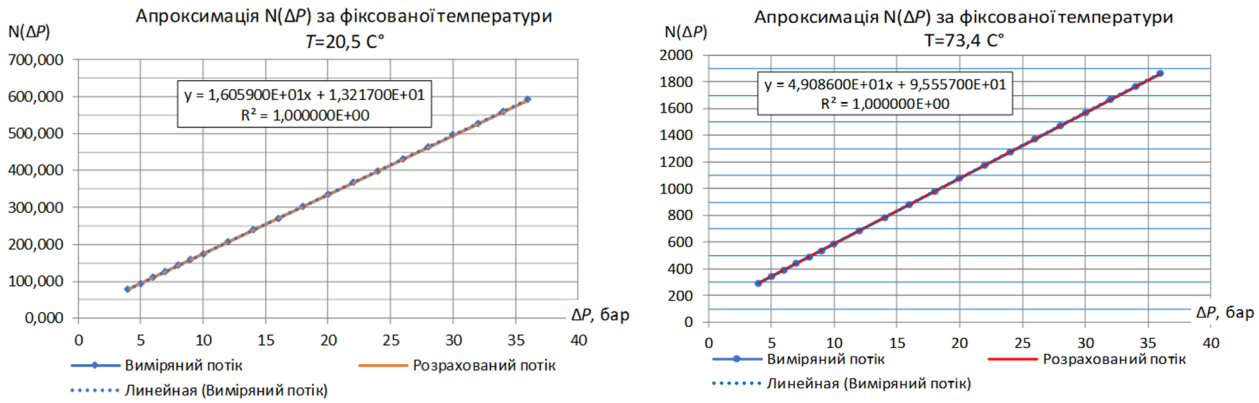
Зупинимося на розгляді різних варіантів отримання формул розрахунку залежності потоку N від перепаду тиску ΔP й температури T на прикладі результатів лабораторних досліджень (табл. 1).

Таблиця 1

Виміряний потік за різних значень перепадів тиску ΔP й температури T

Перепад тиску ΔP, бар	Потік N см³/год за різних температур T				
	20,5 °C	**27,2 °C**	**40,7 °C**	**58,2 °C**	**73,4 °C**
4	77,453	108,277	193,470	195,452	291,901
5	93,512	127,042	215,595	233,394	340,987
6	109,571	145,807	237,720	271,336	390,073
7	125,630	164,572	259,845	309,278	439,159
8	141,689	183,337	281,970	347,220	488,245
9	157,748	202,102	304,095	385,162	537,331
10	173,807	220,867	326,220	423,104	586,417
12	205,925	258,397	370,470	498,988	684,589
14	238,043	295,927	414,720	574,872	782,761
16	270,161	333,457	458,970	650,756	880,933
18	302,279	370,987	503,220	726,640	979,105
20	334,397	408,517	547,470	802,524	1077,277
22	366,515	446,047	591,720	878,408	1175,449
24	398,633	483,577	635,970	954,292	1273,621
26	430,751	521,107	680,220	1030,176	1371,793
28	462,869	558,637	724,470	1106,060	1469,965
30	494,987	596,167	768,720	1181,944	1568,137
32	527,105	633,697	812,970	1257,828	1666,309
34	559,223	671,227	857,220	1333,712	1764,481
36	591,341	708,757	901,470	1409,596	1862,653

Кореляційні дослідження залежності потоку N від перепаду тиску ΔP за фіксованих температур свідчать, що ці кореляційні залежності є лінійними функціями (приклади відповідних графіків наведено на рис. 2а, 2б).



а б

Рис. 2. Залежність потоку N від перепаду тиску Δ*P* за фіксованої температури 20,5 °C (а) і 73,4 °C (б)

Отже, формулою розрахунку потоку залежно від перепаду тиску для кожної фіксованої температури T_j буде лінійна залежність

$$N(\Delta P)|_{T=T_j} = F(\Delta P, \boldsymbol{A}_j) = A_{j1}\Delta P + A_{j2}, \qquad (9)$$

де коефіцієнти A_{j1} й A_{j2} є параметрами даної формули.

У нашому випадку фіксованих температур є 5 варіантів: T_1=20,5 °C; T_2=27,2 °C; T_3=40,7 °C; T_4=58,2 °C; T_5=73,4 °C. В кореляційній формулі (9) для кожної фіксованої температури фігурує два параметри (коефіцієнти). Значення цих параметрів, встановлених за результатами одновимірного кореляційного аналізу, наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри лінійної апроксимації залежностей потоків флюїду від перепадів тиску, виміряних за фіксованих температур T_j

j	T_j °C	Параметри лінійної апроксимації $N(\Delta P)\|_{T=T_j} = A_{j1}\Delta P + A_{j2}$	
		Коефіцієнти A_{j1} при Δ*P*:	Вільні члени A_{j2}
1	20,5	16,059000	13,217000
2	27,2	18,765000	33,217000
3	40,7	22,125000	104,970000
4	58,2	37,942000	43,684000
5	73,4	49,086000	95,557000

Із (9) випливає, що загальною формулою розрахунку потоку N, як функції, залежної від перепаду тиску Δ*P* й температури *T*, буде співвідношення

$$N(\Delta P, T) = A_1(T)\Delta P + A_2(T), \qquad (10)$$

де $A_1(T)$ й $A_2(T)$ – функції, залежні від часу *T*, які визначаються через кореляційний аналіз числових послідовностей, відповідно, $A_{j1}(T_j)$ й $A_{j2}(T_j)$ (табл. 2).

Найбільш зручним рівнянням регресії, що визначає кореляційні функції $A_1(T)$ й $A_2(T)$, є поліноміальні функції. Оскільки дискретів температури T_j й відповідних їм значень коефіцієнтів A_{j1} й A_{j2} незначна кількість, а саме 5, то вочевидь, що виберемо для апроксимації послідовностей $A_{j1}(T_j)$ й $A_{j2}(T_j)$ поліноміальні функції 4-го порядку: $A_1(T) = \sum_{i=1}^{5} a_i T^{(5-i)}$ та $A_2(T) = \sum_{i=1}^{5} b_i T^{(5-i)}$.

Тоді формула (10) для розрахунку потоку набуває вигляду

$$N(\Delta P, T) = \left(\sum_{i=1}^{5} a_i T^{(5-i)}\right)\Delta P + \sum_{i=1}^{5} b_i T^{(5-i)} = \sum_{i=1}^{5}[a_i\Delta P + b_i]\ T^{(5-i)}. \qquad (11)$$

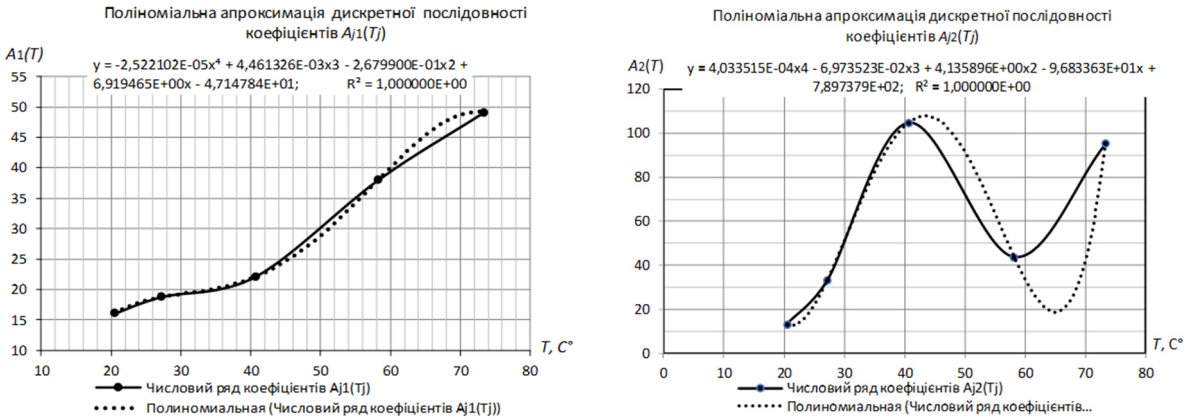
За відміченої поліноміальної апроксимації послідовностей коефіцієнтів $A_{j1}(T_j)$ й $A_{j2}(T_j)$ значення отримуваних функцій $A_1(T)$ й $A_2(T)$ у точках указаних температур відповідають значенням самих цих коефіцієнтів. Отже, враховуючи, що кореляційний зв'язок потоку з перепадом тиску N(Δ*P*) за фіксованих температур фактично є аналітичним (R^2=1, рис. 2а, 2б), за такої поліноміальної апроксимації коефіцієнтів A_{j1} й A_{j2} розраховані за ф. (11) потоки за фіксованих зазначених температур будуть фактично відповідати виміряним потокам. У зв'язку із цим є сподівання, що в інтервалах проміжних температур розраховані потоки будуть також близькими до істинних.

На рис. 3а й 3б наведено графіки апроксимаційних поліноміальних функцій 4-го порядку числових рядів коефіцієнтів $A_{j1}(T_j)$ й $A_{j2}(T_j)$, а в табл. 3 – коефіцієнти a_i й b_i цих апроксимаційних співвідношень.

Незважаючи на значні відхилення функціонального коефіцієнта $A_2(T)$ в діапазоні температур від 40 °C до 73 °C від кривої, побудованої за експериментально виміряними потоками (рис. 5), продовжимо наші дослідження. Отже, розрахунок потоку N за довільних значень перепаду тиску Δ*P* й температури *T* в межах виконаних лабораторних досліджень може здійснюватися за формулою (11), коефіцієнти якої представлено в табл. 3. В табл. 4 наведено розраховані згідно із формулою (11) потоки за тих перепадів тиску і значень температур, за яких виконаної експериментальні лабораторні вимірювання, а в табл. 5 і на рис. 4 – їх розбіжності з вимірюваними (у відсотках).

Наведені в табл. 5 розбіжності розрахованих і виміряних потоків підтверджують висловлену вище тезу про те, що за умови практично аналітичного кореляційного зв'язку потоку з перепадом тиску за фіксованих температур N(Δ*P*, *T*=const) і також аналітичної поліноміальної апроксимації числових рядів $A_{j1}(T_j)$ і $A_{j2}(T_j)$ розраховані за формулою (9) потоки в "точках" вимірювання будуть фактично відповідати виміряним потокам.

Нижче представлено 10 рисунків, на кожному з яких наведено дві криві залежності потоку від температури за фіксованого значення перепаду тиску. Перша з них побудована за даними п'яти експериментально виміряних значень потоку за зазначених п'яти температур (суцільна крива), друга (крапкова крива) – за даними розрахунку потоку згідно з формулою (11), при цьому розрахунок здійснено з кроком зміни температури 2 °C.



а б

Рис. 3. Графік апроксимації поліноміальної функції 4-го порядку числових рядів коефіцієнтів $A_{j1}(T_j)$ (а) та $A_{j2}(T_j)$ (б)

Таблиця 3

Коефіцієнти та вільні члени поліномів

$A_1(T) = \sum_{i=1}^{5} a_i\, T^{(5-i)}$ та $A_2(T) = \sum_{i=1}^{5} b_i\, T^{(5-i)}$

i	a_i	b_i
1	-2,522102E-05	4,033515E-04
2	4,461326E-03	-6,973523E-02
3	-2,679900E-01	4,135896E+00
4	6,919465E+00	-9,683363E+01
5	-4,714784E+01	7,897379E+02

Таблиця 4

Результати розрахунку потоків за формулою (9)

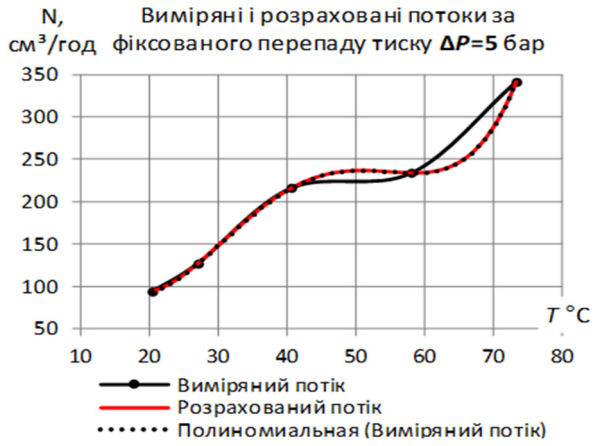
Перепад тиску Δ*P*, бар	**Потік N см³/год при температурах *T***				
	20,5 °C	**27,2 °C**	**40,7 °C**	**58,2 °C**	**73,4 °C**
4	77,453	108,277	193,470	195,452	291,901
5	93,512	127,042	215,595	233,394	340,987
6	109,571	145,807	237,720	271,336	390,073
7	125,630	164,572	259,845	309,278	439,159
8	141,689	183,337	281,970	347,220	488,245
9	157,748	202,102	304,095	385,162	537,331
10	173,807	220,867	326,220	423,104	586,416
12	205,925	258,397	370,470	498,987	684,588
14	238,043	295,927	414,720	574,871	782,760
16	270,161	333,457	458,969	650,755	880,932
18	302,279	370,987	503,219	726,639	979,104
20	334,397	408,517	547,469	802,523	1077,275
22	366,515	446,047	591,719	878,407	1175,447
24	398,633	483,577	635,969	954,290	1273,619
26	430,751	521,107	680,219	1030,174	1371,791
28	462,869	558,637	724,469	1106,058	1469,962
30	494,987	596,166	768,719	1181,942	1568,134
32	527,105	633,696	812,969	1257,826	1666,306
34	559,223	671,226	857,219	1333,710	1764,478
36	591,341	708,756	901,469	1409,593	1862,650

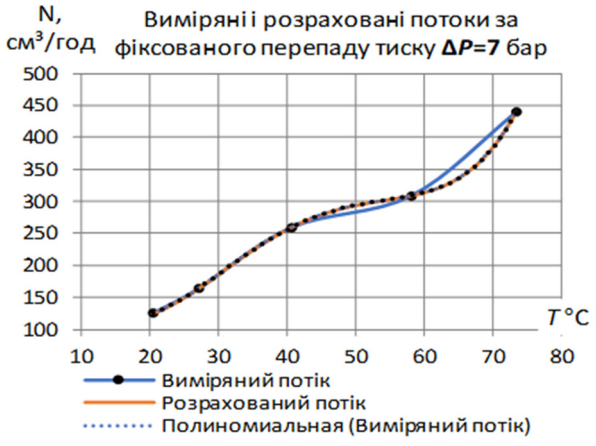
Таблиця 5

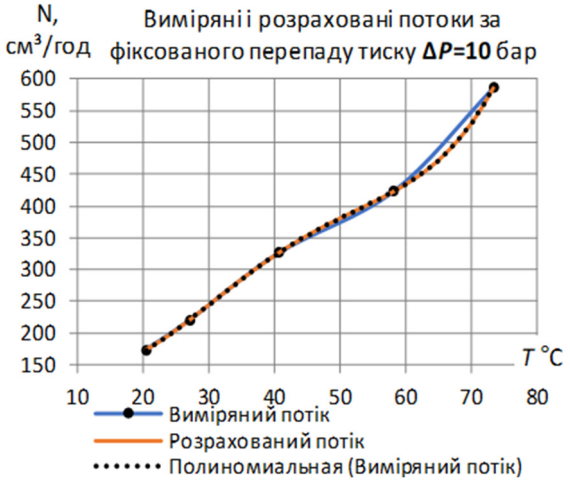
Розбіжність розрахованих і виміряних потоків у відсотках

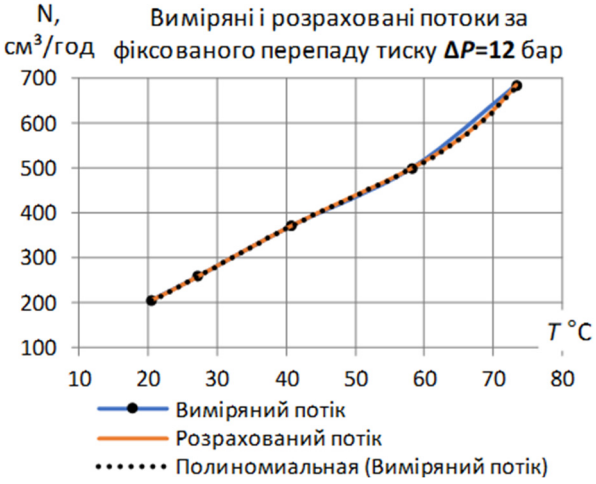
Перепад тиску Δ*P*, бар	**Відхилення (в %) розрахованих потоків від виміряних при температурах *T***				
	20,5 °C	**27,2 °C**	**40,7 °C**	**58,2 °C**	**73,4 °C**
4	-6,427E-05	-5,235E-05	-3,100E-05	-2,862E-06	4,967E-05
5	-6,367E-05	-5,912E-05	-4,724E-05	-3,639E-05	1,004E-05
6	-6,325E-05	-6,414E-05	-6,047E-05	-6,054E-05	-1,961E-05
7	-6,294E-05	-6,802E-05	-7,144E-05	-7,876E-05	-4,263E-05
8	-6,269E-05	-7,111E-05	-8,068E-05	-9,300E-05	-6,102E-05
9	-6,250E-05	-7,362E-05	-8,859E-05	-1,044E-04	-7,606E-05
10	-6,234E-05	-7,571E-05	-9,542E-05	-1,138E-04	-8,857E-05
12	-6,210E-05	-7,897E-05	-1,066E-04	-1,283E-04	-1,082E-04
14	-6,192E-05	-8,141E-05	-1,155E-04	-1,390E-04	-1,229E-04
16	-6,179E-05	-8,330E-05	-1,226E-04	-1,471E-04	-1,344E-04
18	-6,168E-05	-8,480E-05	-1,284E-04	-1,536E-04	-1,435E-04
20	-6,160E-05	-8,603E-05	-1,334E-04	-1,589E-04	-1,510E-04
22	-6,153E-05	-8,705E-05	-1,375E-04	-1,632E-04	-1,572E-04

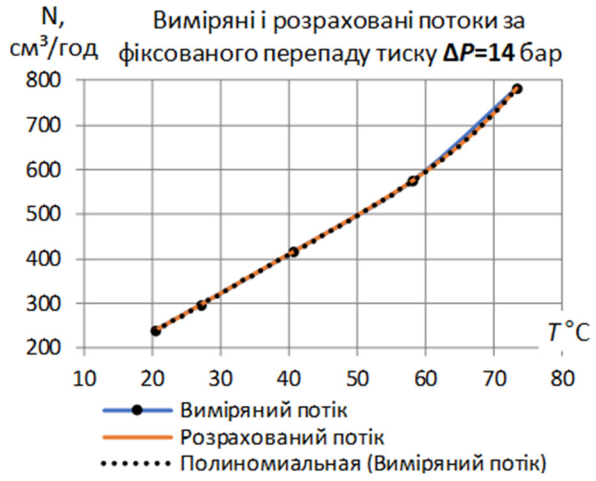
Перепад тиску ΔP, бар	Відхилення (в %) розрахованих потоків від виміряних при температурах T				
	20,5 °C	27,2 °C	40,7 °C	58,2 °C	73,4 °C
24	-6,147E-05	-8,792E-05	-1,411E-04	-1,669E-04	-1,625E-04
26	-6,142E-05	-8,865E-05	-1,443E-04	-1,700E-04	-1,670E-04
28	-6,138E-05	-8,929E-05	-1,470E-04	-1,726E-04	-1,709E-04
30	-6,134E-05	-8,985E-05	-1,495E-04	-1,750E-04	-1,743E-04
32	-6,130E-05	-9,035E-05	-1,516E-04	-1,770E-04	-1,774E-04
34	-6,127E-05	-9,078E-05	-1,536E-04	-1,789E-04	-1,800E-04
36	-6,125E-05	-9,118E-05	-1,553E-04	-1,805E-04	-1,824E-04
MAX=	-6,125E-05	-5,235E-05	-3,100E-05	-2,862E-06	4,967E-05
MIN=	-6,427E-05	-9,118E-05	-1,553E-04	-1,805E-04	-1,824E-04

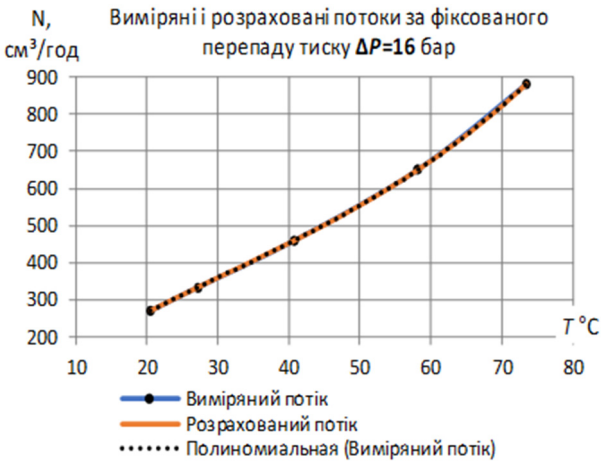












ISSN 1728-3817

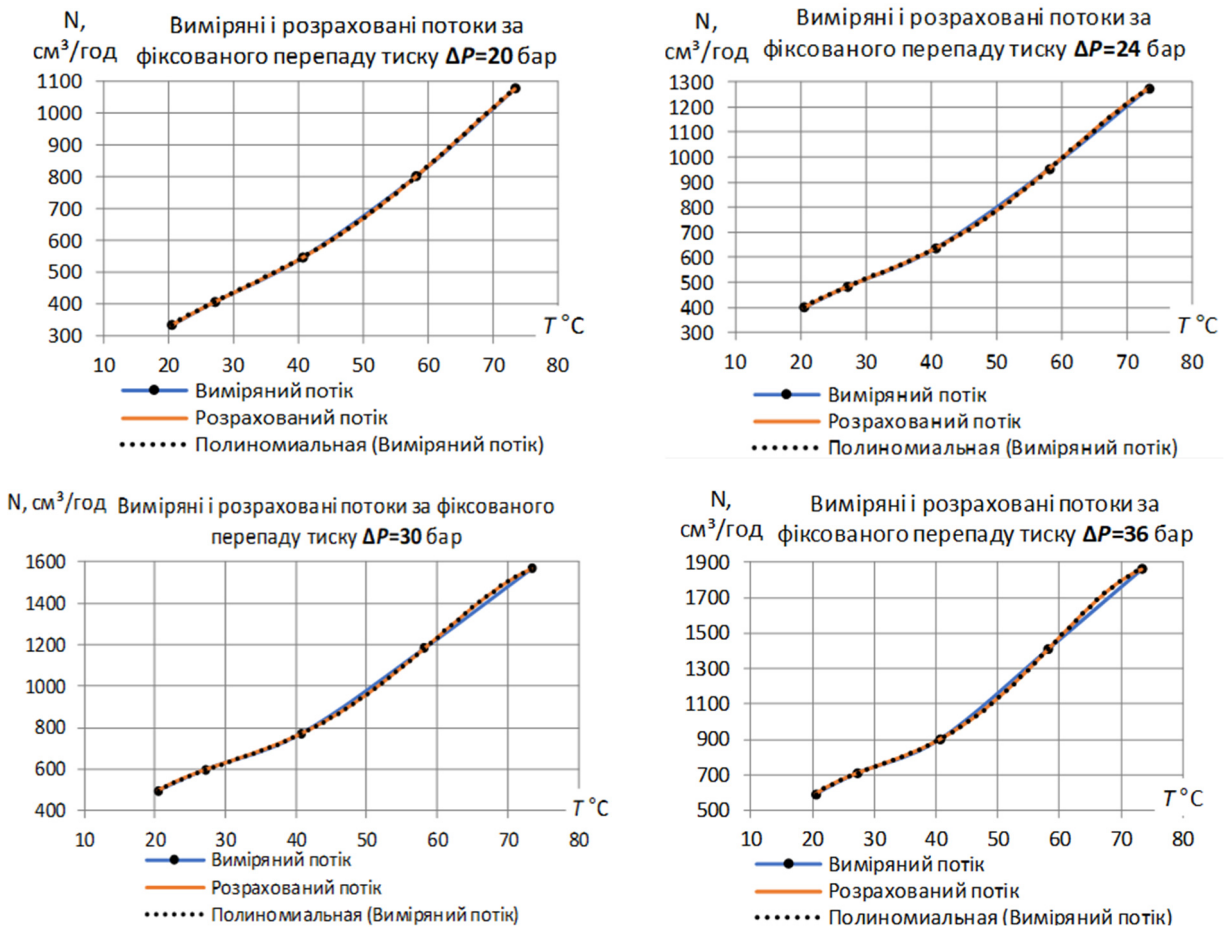


Рис. 4. Графіки залежності потоку від температури за фіксованого значення перепаду тиску

Дискусія і висновки

Встановлено аналітичну залежність потоку нафти від пластової температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов та порівняння розрахунків на її основі з великим масивом експериментальних даних. Аналіз наведених розрахунків та графіків (табл. 5, рис. 4) свідчить про практично повну збіжність експериментально виміряних і розрахованих потоків в діапазоні температур від 20 °С до 40 °С за будь-яких перепадів тиску. У разі перепадів тиску $\Delta P \geq 7$ бар графіки експериментально виміряного потоку і розрахованого за формулою (11) практично збіжні, їх розбіжність не перевершує 5–6 %. Відносно суттєва розбіжність графіків ($\delta \leq 20$ %) спостерігається у разі перепадів тисків менше 5–7 бар за температур 40–73 С°. Це, вочевидь, пояснюється суттєвою розбіжністю апроксимаційного функціонального коефіцієнта $A_2(T)$ від експериментального графіка (рис. 3а, б). Для поліпшення збіжності необхідно апроксимацію числового ряду коефіцієнтів $A_{j2}(T_j)$ здійснювати поліномом більш високого порядку.

Розраховані за аналітичною формулою (11) значення потоків повністю збіжні зі значеннями поліномів 4-го порядку, якими апроксимуються залежності експериментально виміряних потоків від температур за фіксованих перепадів тиску на торцях зразка 16–36 бар. Також повністю збіжні розраховані потоки з потоками, виміряними за різних перепадів тиску при постійних температурах (рис. 2а, б). Як зазначено вище, такі обставини пов'язані з практично аналітичною апроксимацією (коефіцієнт детермінації R^2=1) потоків, виміряних при різних перепадах тиску за постійних температур, а також числових послідовностей коефіцієнтів $A_{j1}(T_j)$ й $A_{j2}(T_j)$ (рис. 3а, б).

Внесок авторів: Сергій Вижва – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування); Віктор Онищук – методологія, аналіз і обробка даних, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Іван Гафич – методологія, формальний аналіз, аналіз літературних джерел і наукових праць; Іван Онищук – валідація даних, аналіз і обробка даних, методологія, написання (перегляд і редагування); Микола Рева – валідація даних, аналіз і обробка даних, методологія, написання (перегляд і редагування); Олександр Шабатура – програмне забезпечення, формальний аналіз, аналіз літературних джерел і наукових праць.

Подяки. Автори висловлюють щиру подяку ст. лаборанту Цуману В.С. за його активну й високопрофесійну участь у підготовці зразків і лабораторних дослідженнях.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

Вижва, С. А., Венгрович, Д. Б., Онищук, В. І., Онищук, І. І., & Даценко, А. Б. (2025). Фізичне моделювання процесу протікання нафти через породу-колектор у пластових умовах (на прикладі пісковиків Розумівського газоконденсатного родовища). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(109), 22–30. http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.03

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Олійник, О. В., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2020). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського*

національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 1(88), 25–33.http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2021). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених порід північної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(94), 37–45. http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2022а). Колекторські властивості глибокозанурених ущільнених порід карбону центрального грабена ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(96), 11–19. https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2022б). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених теригенних порід кембрію східного схилу Львівського палеозойського прогину. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(98), 33–41. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.04

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, Д. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2024). Порівняльна характеристика фільтраційно-ємнісних властивостей ущільнених теригенних порід Дніпровсько-Донецької западини та східного схилу Львівського палеозойського прогину. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(107), 46–59. http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.06

Вижва, С. А., Орлюк, М. І., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Друкаренко, В. В., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41(4), 145–160. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380

Горовенко, А. П., Венгрович, Д. Б., & Шеремет, Г. П. (2022). Фільтрація вуглеводнів кернами пористого середовища в полі акустичних коливань. *Геоінженерія*, 7, 17–22. https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267556

Карпенко, О., Башкіров, Г., & Карпенко, І. (2014). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(66), 71–76. https://doi.org/10.17721/1728-2713.66.13

Маслов, Б. П., Онищук, І. І., & Шинкаренко, А. В. (2017). Моделювання нелінійних в'язко-пружних властивостей теригенно-вапняковистих пісковиків. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(77), 99–105. http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13

Михайлов, В. А., Вижва, С. А., Загнітко, В. М. та ін. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження (Кн. IV)*. ВПЦ "Київський університет".

Нестеренко, М. Ю. (2010). *Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів*. УкрДГРІ.

Орлюк, М. И., & Друкаренко, В. В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35(2), 127–136. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111356

Орлюк, М. І., & Друкаренко, В. В. (2018). Прогноз шляхів проходження та місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегменту Дніпровсько-Донецького авлакогену за геомагнітними даними. *Геофизический журнал*, 40(2), 123–140. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128935

Орлюк, М. И., & Пашкевич, И. К. (2011). Магнитная характеристика и разломная тектоника земной коры Шебелинской группы газовых месторождений как составная часть комплексных поисковых критериев углеводородов. *Геофизический журнал*, 33(6), 136−151. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799

Пашкевич, И. К., Орлюк, М. И., & Лебедь, Т. В. (2014). Магнитная неоднородность, разломная тектоника консолидированной земной коры и нефтегазоносность Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геофизический журнал*, 36(1), 64–80.

Рибалка, С., & Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості теригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 56–59. https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08

Соболь, В., & Карпенко, О. (2021). Нова модель проникності теригенних гранулярних колекторів на прикладі турнейських відкладів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(92), 61–66. http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09

Al-Shami, T. M., Mahmoud, M., Tariq, Z., & Abdulraheem, A. (2022). An accurate reservoir's bubble point pressure correlation. *ACS Omega*, 7(15), 12792–12803. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00651

Awad, A. M., El-Sayed, A. A. H., & El-Maksoud, M. A. (2022). A reservoir bubble point pressure prediction model using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) technique with trend analysis. *PLOS One*, 17(8), Article e0272790. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272790

Esmaeili, S., Maini, B., Ul Abidin, Z., & Kantzas, A. (2025). Experimental investigation of the effect of solvent type and its concentration on the performance of ES-SAGD. *Methods and Protocols*, 8(2), Article 39. https://doi.org/10.3390/mps8020039

Gao, X., Jiang, T., & Li, Y. (2025). A Generalized Model for Estimating the Viscosity of Crude Oil. *Processes*, 13(5), 1433. https://doi.org/10.3390/pr13051433

Gharbi, R., & Elsharkawy, A. M. (2003). Predicting the Bubble-Point Pressure and Formation-Volume-Factor of Worldwide Crude Oil Systems. *Petroleum Science and Technology*, 21(1–2), 53–79. https://doi.org/10.1081/LFT-120016921

Imai, M., Okajima, K., & Kanno, T. (2020). Application of a digital oil model to solvent-based enhanced oil recovery of heavy crude oil. *Energy & Fuels*, 34(1), 302–311. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02801

Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko, V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower visean organic-rich formations in Glynsko-Solohivskyi petroleum region. *Geodynamics*, 1(34), 80–96. https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080

Li, J., Zhang, W., Qu, B., Zhen, E., Qian, Z., Ma, S., Qin, F., & You, Q. (2025). Physical modeling of high-pressure flooding and development of oil displacement agent for carbonate fracture-vuggy reservoir. *Processes*, 13(1), Article 71. https://doi.org/10.3390/pr13010071

MacDonald, A., & Miadonye, A. (2017). Improvement on the Viscosity Models for the Effects of Temperature and Pressure on the Viscosity of Heavy Crude Oils. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 62(3), 924–930. https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00619

Manfre Jaimes, D., & Clarke, M. (2020). Analytical modeling of the cyclic ES-SAGD process. *Energies*, 13(16), Article 4243. https://doi.org/10.3390/en13164243

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., & Solodkyi, E. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the hlynsko-solokhivskyi oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2(25), 71–88. https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071

Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Bakarjieva, M. I. (2021). *Geomagnetic field of the western region of Ukraine in connection with the fracture-block tectonics and hydrocarbon deposits*. XXth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May, Kyiv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521067

Pengxiang, D., Liu, T., You, Z., Jiang, B., & Jian, Z. (2018). Effect of low velocity non-Darcy flow on pressure response in shale and tight oil reservoirs. *Fuel*, 216, 398–406. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.041

Tariq, Z., Mahmoud, M., & Abdulraheem, A. (2021). Machine Learning-Based Improved Pressure–Volume–Temperature Correlations for Black Oil Reservoirs. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(11), 113003. https://doi.org/10.1115/1.4050579

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., & Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища*, 12–15 листопада 2019, Київ, Україна. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224

Wang, H., Tian, L., Gu, D. et al. (2020). Method for Calculating Non-Darcy Flow Permeability in Tight Oil Reservoir. *Transport in Porous Media*, 133, 357–372. https://doi.org/10.1007/s11242-020-01427-8

Wang, Z., Li, S., Dang, F., Li, M., & Husein, M. M. (2025). Rheological behavior and flow characteristics of oil-based CO2 foam under varying petroleum industry conditions. *Fuel*, 385, 134086. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134086

Yang, S., & Yang, D. (2025). Integrated characterization of expanding-solvent steam-assisted gravity drainage (ES-SAGD) processes by using a heat-penetration criterion within a unified, consistent, and efficient framework. *SPE Journal*, 30(1), 272–294. https://doi.org/10.2118/218051-PA

Zargar, Z., Razavi, S. M., & Ali, S. M. F. (2020). Analytical model of steam-assisted gravity drainage (SAGD) process in relation to constant injection rate. *Fuel*, 265, Article 116772. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116772

Zong, P., Xu, H., Tang, D., & Huo, F. (2024). Threshold pressure gradient in fractured reservoirs: Experimental simulation and mathematical modeling. *Physics of Fluids*, 36, 063104. https://doi.org/10.1063/5.0208427

References

Al-Shami, T. M., Mahmoud, M., Tariq, Z., & Abdulraheem, A. (2022). An accurate reservoir's bubble point pressure correlation. *ACS Omega*, 7(15), 12792–12803. https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00651

Awad, A. M., El-Sayed, A. A. H., & El-Maksoud, M. A. (2022). A reservoir bubble point pressure prediction model using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) technique with trend analysis. *PLOS One*, 17(8), Article e0272790. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272790

Esmaeili, S., Maini, B., Ul Abidin, Z., & Kantzas, A. (2025). Experimental investigation of the effect of solvent type and its concentration on the performance of ES-SAGD. *Methods and Protocols*, 8(2), Article 39. https://doi.org/10.3390/mps8020039

Gao, X., Jiang, T., & Li, Y. (2025). A Generalized Model for Estimating the Viscosity of Crude Oil. *Processes*, 13(5), 1433. https://doi.org/10.3390/pr13051433

Gharbi, R., & Elsharkawy, A. M. (2003). Predicting the Bubble-Point Pressure and Formation-Volume-Factor of Worldwide Crude Oil Systems. *Petroleum Science and Technology*, 21(1–2), 53–79. https://doi.org/10.1081/LFT-120016921

Gorovenko, A. P., Vengrovych, D. B., & Sheremet, G. P. (2022). Hydrocarbon filtration by porous media cores in the field of acoustic vibrations. *Geoengineering*, 7, 17–22 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267556

Imai, M., Okajima, K., & Kanno, T. (2020). Application of a digital oil model to solvent-based enhanced oil recovery of heavy crude oil. *Energy & Fuels*, 34(1), 302–311. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02801

Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko, V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower visean organic-rich formations in Glynsko-Solohivskyi petroleum region. *Geodynamics*, 1(34), 80–96. https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080

Karpenko, O., Bashkirov, G., & Karpenko, I. (2014). Geophysical data: estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(66), 71–76 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.66.13

Li, J., Zhang, W., Qu, B., Zhen, E., Qian, Z., Ma, S., Qin, F., & You, Q. (2025). Physical modeling of high-pressure flooding and development of oil displacement agent for carbonate fracture-vuggy reservoir. *Processes*, 13(1), Article 71. https://doi.org/10.3390/pr13010071

MacDonald, A., & Miadonye, A. (2017). Improvement on the Viscosity Models for the Effects of Temperature and Pressure on the Viscosity of Heavy Crude Oils. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 62(3), 924–930. https://doi.org/10.1021/acs.jced.6b00619

Manfre Jaimes, D., & Clarke, M. (2020). Analytical modeling of the cyclic ES-SAGD process. *Energies*, 13(16), Article 4243. https://doi.org/10.3390/en13164243

Maslov, B., Onyshchuk, I., & Shynkarenko, A. (2017). Modelling of nonlinear viscoelastic properties of terrigenous-calcareous sandstones. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(77), 99–105 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13

Mykhailov, V. A., Vyzhva, S. A., Zagnitko, V. M., et al. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations (Book IV)*. Kyiv University Publishing [in Ukrainian].

Nesterenko, M. Yu. (2010). *Petrophysical basis of the substantiating of fluid saturation of reservoir rocks*. UkrDHRI [in Ukrainian].

Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., & Solodkyi, E. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the hlynsko-solokhivskyi oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2(25), 71–88. https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071

Orlyuk, M. I., & Drukarenko, V. V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets depression. *Geophysical journal*, 35(2), 127–136 [in Russian]. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111356

Orlyuk, M. I., & Drukarenko, V. V. (2018). Prediction of pathways and places of accumulation for hydrocarbons of the Chernigiv segment of the Dnieper-Donets aulacogene in relation to magnetic heterogeneity. *Geophysical journal*, 40(2), 123–140 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.128935

Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Bakarjieva, M. I. (2021). *Geomagnetic field of the western region of Ukraine in connection with the fracture-block tectonics and hydrocarbon deposits*. XXth International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May, Kyiv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521067

Orlyuk, M., & Pashkevich, I. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinka group of gas fields as a component of the complex search criteria for hydrocarbons. *Geophysical journal*, 33(6), 136−151 [in Russian]. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799

Pashkevich, I. K., Orlyuk, M. I., & Lebed, T. V. (2014). Magnetic data, fault tectonics of consolidated earth crust and oil-and-gas content of the Dnieper-Donets avlakogen. *Geophysical journal*, 36(1), 64–80 [in Russian].

Pengxiang, D., Liu, T., You, Z., Jiang, B., & Jian, Z. (2018). Effect of low velocity non-Darcy flow on pressure response in shale and tight oil reservoirs. *Fuel*, 216, 398–406. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.041

Rybalka, S., & Karpenko, O. (2016). Central part of the Dnieper-Donets Basin: Reservoir properties of deep-laid terrigenous rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(72), 56–59 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08

Sobol, V., & Karpenko, O. (2021). A new model of permeability of terrigenous granular reservoirs on the example of turney deposits of Yablunivske oil and gas condensate field of the Dnieper-Donets basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 61–66 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09

Tariq, Z., Mahmoud, M., & Abdulraheem, A. (2021). Machine Learning-Based Improved Pressure–Volume–Temperature Correlations for Black Oil Reservoirs. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(11), 113003. https://doi.org/10.1115/1.4050579

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliinyk, O., Reva, M., & Shabatura, O. (2020). Lower permian carbonate deposits reservoir parameters of western part of Hlynsko-Solohivska area of Dnieper-Donets depression gas-oil-bearing district. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(88), 25–33 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., & Shabatura, O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lokhvytsky zone of the Dnieper-Donets Depression). *Geophysical journal*, 41(4), 145–160 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2021). Porosity and permeability properties of consolidated rocks of the northern near edge zone of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(94), 37–45 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2022a). Reservoir properties of deep-seated consolidated rocks of carboniferous period of the central graben of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(96), 11–19 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2022b). Reservoir properties of consolidated terrigenous rocks of cambrian period of the eastern slope of the Lviv paleozoic depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(98), 33–41 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.04

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, D., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2024). Comparative characteristics of reservoir properties of consolidated terrigenous rocks of the Dnieper-Donets depression and the eastern slope of the Lviv paleozoic depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(107), 46–59 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.107.06

Vyzhva, S., Vengrovych, D. B., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., & Datsenko, A. B. (2025). Physical modeling of oil flow through the reservoir rock under reservoir conditions (on the example of sandstones of the Rozumivske gas condensate field). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(109), 22–30. http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.03 [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., & Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 12–15 November, Kyiv, Ukraine. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224

Wang, H., Tian, L., Gu, D., et al. (2020). Method for Calculating Non-Darcy Flow Permeability in Tight Oil Reservoir. *Transport in Porous Media*, 133, 357–372. https://doi.org/10.1007/s11242-020-01427-8

Wang, Z., Li, S., Dang, F., Li, M., & Husein, M. M. (2025). Rheological behavior and flow characteristics of oil-based CO2 foam under varying petroleum industry conditions. *Fuel*, 385, 134086. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134086

Yang, S., & Yang, D. (2025). Integrated characterization of expanding-solvent steam-assisted gravity drainage (ES-SAGD) processes by using a heat-penetration criterion within a unified, consistent, and efficient framework. *SPE Journal*, 30(1), 272–294. https://doi.org/10.2118/218051-PA

Zargar, Z., Razavi, S. M., & Ali, S. M. F. (2020). Analytical model of steam-assisted gravity drainage (SAGD) process in relation to constant injection rate. *Fuel*, 265, Article 116772. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116772

Zong, P., Xu, H., Tang, D., & Huo, F. (2024). Threshold pressure gradient in fractured reservoirs: Experimental simulation and mathematical modeling. *Physics of Fluids*, 36, 063104. https://doi.org/10.1063/5.0208427

Отримано редакцією журналу / Received: 05.01.26
Прорецензовано / Revised: 06.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Serhii VYZHVA[1], DSc (Geol.), Prof., Cor. Member of NAS of Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Viktor ONYSHCHUK[1], PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-2301-2202
e-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua

Ivan GAFICH[2], PhD (Geol.-Min.)
ORCID ID: 0009-0001-3219-5143
e-mail: gafichip@dtek.com

Ivan ONYSHCHUK[1], PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0009-0004-0186-7578
e-mail: ivan.onyshchuk@knu.ua

Mykola REVA[1], PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0009-1307-7617
e-mail: mvreva@gmail.com

Oleksandr SHABATURA[1], DSc (Geol.)
ORCID ID: 0000-0003-0810-3701
e-mail: oshabatura@knu.ua

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]DTEK Oil&Gas, Kyiv, Ukraine

DETERMINATION OF ANALYTICAL DEPENDENCE OF OIL FLOW ON TEMPERATURE AND PRESSURE IN PHYSICAL MODELING OF RESERVOIR CONDITIONS

B a c k g r o u n d . ***The paper presents the results of physical modeling of oil flow through a reservoir rock. The research aim was to determine the analytical dependence of oil flow on reservoir temperature and pressure during physical modeling of in-situ conditions.***

M e t h o d s . ***The specialized high-pressure laboratory system (VSTs-1000M) was used for experimental laboratory studies of oil flow through rock samples. The correlation analysis was applied for theoretical calculations to establish the analytical dependence of oil flow on reservoir temperature and pressure.***

R e s u l t s . ***The results of experimental laboratory studies of oil flow under various PT-conditions are presented. The analytical dependence of oil flow on reservoir temperature and pressure during physical modeling of reservoir conditions has been established. A comparison was made between experimental laboratory data and values calculated using the derived analytical dependence.***

C o n c l u s i o n s . ***The oil flow values calculated via the analytical dependence are in full agreement with the 4th-order polynomials used to approximate experimentally measured flows as a function of temperature at fixed pressure drops of 16–36 bar at the sample ends. Furthermore, the calculated flow rates fully match the flow rates measured at different pressure drops and constant temperatures. These dependencies can be applied in the interpretation of well logging data and the modeling of petrophysical (porosity and permeability) parameters of reservoir rocks.***

K e y w o r d s : ***temperature, pressure, physical modeling of reservoir conditions, reservoir properties, analytical dependencies.***

Сергій Вижва є головним редактором видання, тому не брав участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті. Олександр Шабатура є членом редколегії видання, тому не брав участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті.

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.

Serhii Vyzhva is the editor-in-chief, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article. Oleksandr Shabatura is the a member of the journal editorial board, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article.

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 54.027:546.22:549.76:551.44
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.02

Tofik AKHMEDOV, DSc (Geol. & Mineral.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0634-5600
e-mail: ahmedovtofiq47@gmail.com
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Amikishi ASADLI, Doctoral Student
ORCID ID: 0009-0003-0711-8028
e-mail: amikishiasadli@gmail.com
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Goychek TASHVIQI, Doctoral Student
ORCID ID: 0009-0002-4256-0949
e-mail: goycek.tesviqi@gmail.com
Institute of Geology and Geophysics
of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan, Baku, Azerbaijan

PREDICTION OF ABNORMALLY HIGH FORMATION PRESSURE ZONES USING 3D SEISMIC INVERSION DATA

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. Г.Д. Лісним)

Background. *The article provides information about the location of the Hovsan field under study, the history of its investigation by various geological and geophysical methods, and the main results obtained. It is noted that the study of this area began as early as the 19th century from the adjacent Surakhany-Karachukhur area, where the first exploratory well was drilled (Karachukhur area). From the 1930s to the 1940s, various geophysical surveys were also carried out within the study area, and as a result of electrical prospecting, the first understanding of the tectonics of the Bina-Hovsan syncline was obtained. Gas survey data later made it possible to identify anomalous zones within the Hovsan field. Seismic exploration was conducted from the 1930s to the mid-1950s using the reflection-seismic method (RM), and in 1977–1978 using the common depth point (CDP) method. Individual seismic profiles were acquired in 1993 and 1999. Detailed CDP surveys were carried out in 1996 and in 2003-2004. In 1948, oil was discovered in well No. 1308 in the Kalin Suite of the Productive Series, after which the Hovsan oil field was put into commercial development. The field is currently exploited only onshore, since its offshore boundaries remain undefined due to insufficient study.*

Methods. *In 2011–2012, 3D CDP seismic surveys were carried out in the Zykh-Hovsan area. These surveys were conducted under varying near-surface seismic-geological conditions, covering a total area of 70 km². Information is provided on the field operations: four types of seismic energy sources and three types of recording receivers were used in this area. During the field setup, source matching was not properly implemented, which created difficulties during data processing. In addition, receiver calibration was only partially completed, leading to further complications. Special attention is given to the implementation of seismic inversion.*

Vertical seismic profiling (VSP) surveys were successfully conducted in two wells of the Hovsan field wells 1856 and 1867. Brief information is presented regarding the borehole surveys and the processing of the acquired data.

Results. *Pseudo-acoustic inversion (PAC inversion) was obtained, and a comparison of vertical slices of the absolute and relative acoustic impedance cubes along one of the 3D survey lines of the Hovsan field showed that, in both sections, a strong decrease in acoustic impedance values is observed at the level of the underlying PS deposits. This decrease is mainly associated with a sharp reduction in seismic wave velocities and densities from 110 to 2598 (m/s)×(g/cm³) in clay-rich, fluid-saturated formations, which are typical for zones of abnormally high reservoir pressure (AHRP).*

The presence of an AHRP zone is also confirmed by the VSP results obtained from the two wells in the field.

Surface and borehole seismic studies made it possible to identify an AHRP zone in the Hovsan field section. Stratigraphically, the AHRP interval encompasses the underlying PS deposits, which are represented lithofacially by clay-rich sediments with interbedded sands. These sand interlayers did not appear on conventional seismic sections. However, seismic inversion of the 3D seismic data made it possible to distinguish these sandy intervals.

Conclusions. *A very important conclusion is that the AHRP zone is clearly identified on vertical sections of both the absolute acoustic impedance and the relative impedance. Thus, it can be stated that seismic inversion of 3D seismic data can be used to predict the AHRP zone.*

A well drilled into the Miocene deposits in 2015 confirmed our assumptions and produced a flow of approximately 100 tons of oil per day, further confirming the hydrocarbon potential of the underlying PS deposits within the study area.

Keywords: *oil and gas content, seismic inversion, seismic section, VSP, Miocene deposits, 3D seismic survey.*

Background

The Hovsan field, located within one of the oldest oil and gas–bearing regions in the world, the Absheron oil and gas province is currently among the most actively developed onshore fields of Azerbaijan (Fig. 1). In the Absheron region, the main hydrocarbon-bearing reservoirs are situated within the Productive Series (PS) of the Lower Pliocene. Over roughly two centuries of industrial development of Azerbaijan's oil fields (primarily on the Absheron Peninsula), more than 2 billion tons of oil and condensate have been produced from PS deposits (Abdullayev, Riley, & Bowman, 2012; Salmanov et al., 2023). In recent years, geologists and geophysicists in the country have increasingly focused on formations lying deeper than the PS (Leila et al., 2022). In this regard, the Hovsan field is no exception.

The study of the area began in the 19th century from the neighboring Surakhany-Karachukhur area, where an exploratory well was drilled (Karachukhur area). From the 1930s to the 1940s, various geological and geophysical studies of different scales were also carried out (Ahmedov, Kerimova, & Khalilova, 2024) within the study area. As a result of electrical prospecting, the first understanding of the tectonics of the Bina-Hovsan syncline was obtained, and gas survey data made it possible to identify anomalous zones

© Akhmedov Tofik, Asadli Amikishi, Tashviqi Goychek, 2026

within the Hovsan field. Seismic exploration was conducted in 1937–1941, 1945–1949, 1949–1951, and 1955 using the reflection-seismic method (RSM), and in 1977–1978 using the common depth point (CDP) method. Individual profiles were acquired in 1993 and 1999. In 1996 and in 2003–2004, detailed CDP seismic surveys were carried out by the "Azneftegeophysics" Trust (Exploration Geophysics Department) (Akhmedov, & Khalilova, 2024).

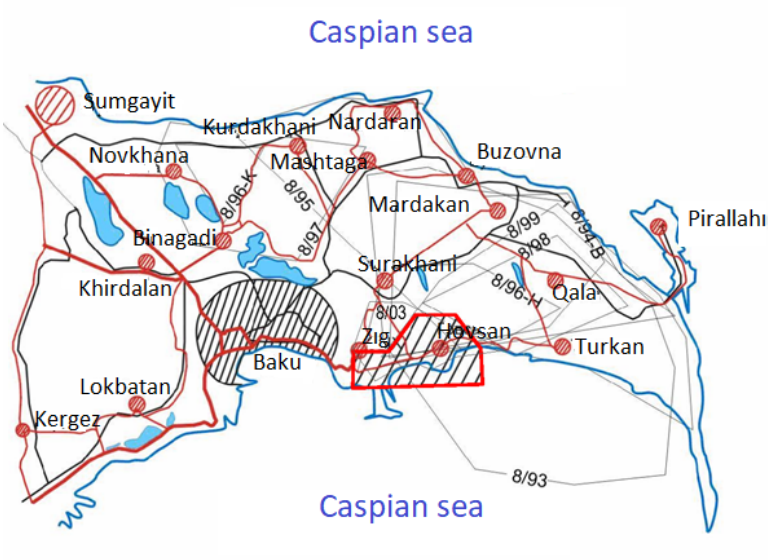


Fig. 1. Surveyed area of the study with seismic exploration activities

In 1993, seismic surveys using the "land-sea" method were carried out, partially covering the southeastern part of the area.

Based on the results of geological and geophysical studies and deep drilling, two fields were discovered within the study area: Zykh in the west and Hovsan in the eastern part. Both fields are currently under development (Abdolahi, Chehrazi, & Kadkhodaie, 2022; Abdullayev, Riley, & Bowman, 2012; Aghayev, 2023; Ahmadov, 2025).

Drilling in the Zykh-Hovsan area began in the 1930s. In 1935, the Zykh field was discovered and put into operation. The discovery well was Well No. 12, which produced commercial oil from the Balakhany Suite of the Productive Series (PS). Between 1936 and 1940, oil accumulations were identified in the suites of the lower part of the PS (NKP, KS, PK, and KaS). In total, 235 wells of various purposes have been drilled at the field. Most of the drilling was carried out in the 1940s–1950s. In the 1990s, nine wells were drilled. As of 2001, the producing well stock consisted of 10 wells.

Between 1932 and 1935, a large number of exploratory and structural wells were drilled in the Hovsan area. In total, 311 exploratory, appraisal, and production wells were drilled within and near the studied area. Some of the wells within the Hovsan field penetrated Pontian (Upper Miocene) deposits, while the remaining wells were terminated in the lower or upper parts of the Neogene deposits of the Productive Series.

Based on the obtained data, the monoclinal structure of the strata was established. In 1948, Well No. 1308 discovered an oil field within the Kalin Suite of the Productive Series, and the Hovsan oil field was subsequently put into commercial development. The field is exploited only onshore, as its offshore boundaries remain undefined due to insufficient study.

Methods

To study the velocity model of the subsurface (Starostenko, Legostaeva, & Savchenko, 2014), seismic well-logging (SWL) investigations were carried out in Well 60 of the Karachukhur area, and in 1949–1950 in Wells 156 and 191 of the Zykh area, as well as in Wells 1310 and 1508 of the Hovsan area. In addition, vertical seismic profiling (VSP) was conducted in Hovsan Wells 1856 (in 2010) and 1867 (in 2014).

In 2011–2012, 3D CDP seismic surveys were conducted across the Zykh-Hovsan area. These seismic surveys were carried out under varying near-surface seismic–geological conditions, covering a total area of 70 km².

The observation system consisted of a centrally symmetric ("cross") receiver layout with 14 lines of 144 active channels each, and a grid of source and receiver profiles spaced 300×300 m. This arrangement provided a nominal fold of 84 and ensured a uniform distribution of survey attributes. The spacing between receivers and sources was 50 m, resulting in a total of 144×14=2,016 active channels. Within the layout template, 42 sources were activated. For this fixed configuration, excitation was applied at 42 shot points along the source line (between the 4th and 11th receiver lines), located between channels 71 and 72. The layout was then shifted 300 m along the receiver lines, and the next 42 shot points were processed, continuing in this manner until the entire survey block was covered.

Seismic data acquisition and recording were carried out using the I/O IMAGE telemetry system (USA). The results of the processing and comprehensive interpretation of these surveys are presented in the current study.

In this area, four types of seismic sources and three types of recording receivers were used (Fig. 2). During the field setup, source matching was not properly implemented, which caused difficulties during processing. In addition, receiver matching was only partially completed, leading to further complications.

For an objective assessment of the field seismic data, as well as for the classification of present noise and the selection of procedures for its attenuation and suppression, the amplitudes and dominant frequencies of both the useful signal and low-velocity surface-wave noise were calculated from the common-shot-point seismograms using the QCAMP module.

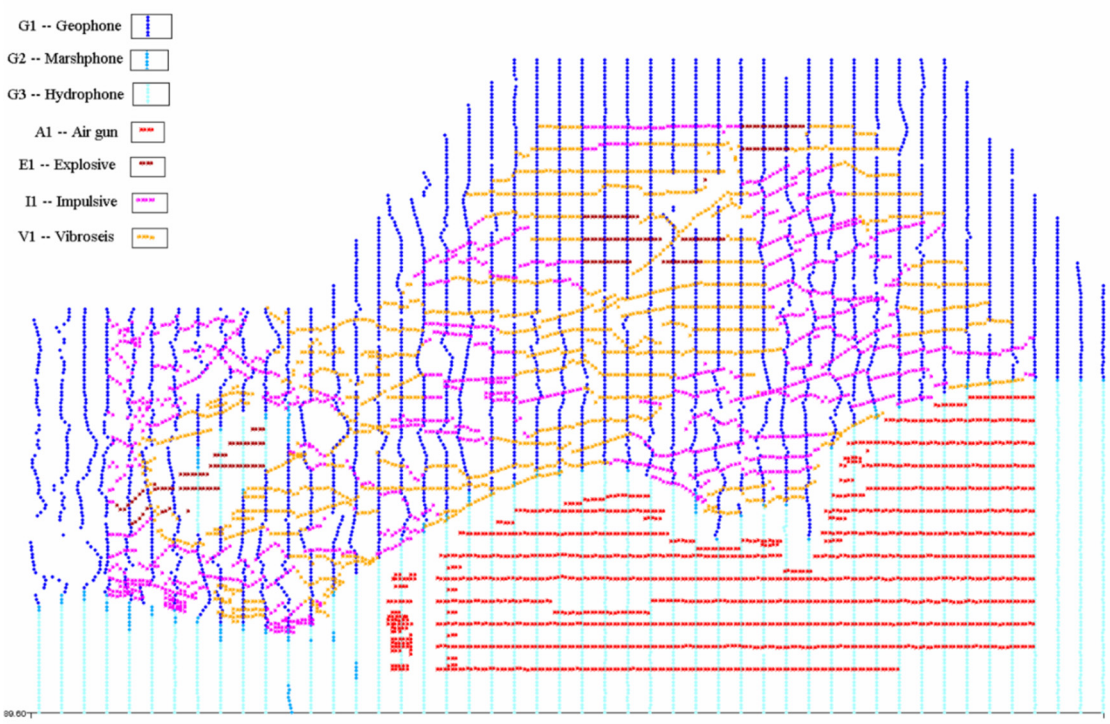


Fig. 2. Seismic sources and receivers used

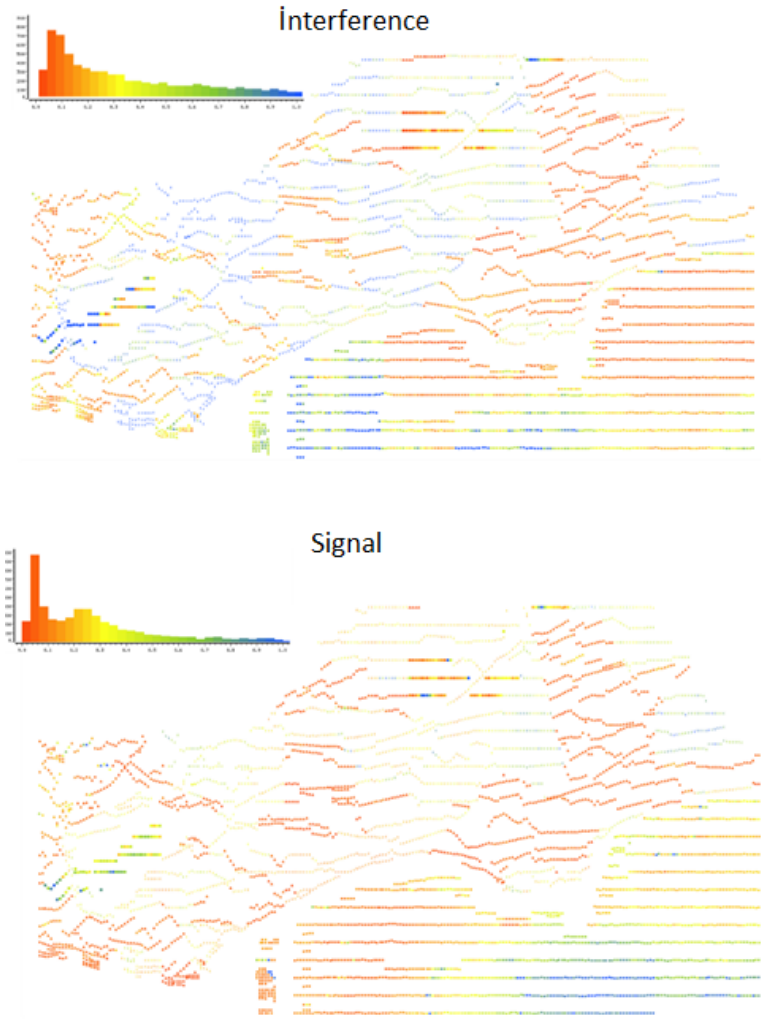


Fig. 3. Amplitude spectra of the useful signal and noise within the cone

The amplitude spectrum of the useful signal (Fig. 3) was calculated at offsets of 850–1500 m within a time window of 800–2500 ms, while the amplitude and frequency of low-velocity surface-wave noise were determined at offsets of 0–500 m within the same window. Analysis of the results showed that areas with different types of sources are clearly distinguishable on the amplitude map. The lowest amplitude values were observed for the impulsive source. In addition, seismograms from the acoustic source also differ from one another. The dispersion of dominant frequencies across the area varies significantly, which may be related to the different types of sources (Fig. 3). In general, the signal frequencies across the area range from 5 Hz to 35 Hz, with most of the data having signal frequencies between 10 Hz and 20 Hz. Figures 4 and 5 show fragments of representative field seismograms of the sources and their amplitude frequency spectra. Overall, the seismograms are complicated by surface-wave cones of varying intensity and frequency. For the impulsive source, a high noise level and a low signal-to-noise ratio are characteristic. Additionally, the use of overlay charges on the lake proved to be ineffective, as the seismograms exhibited strong surface noise and low useful-signal frequencies.

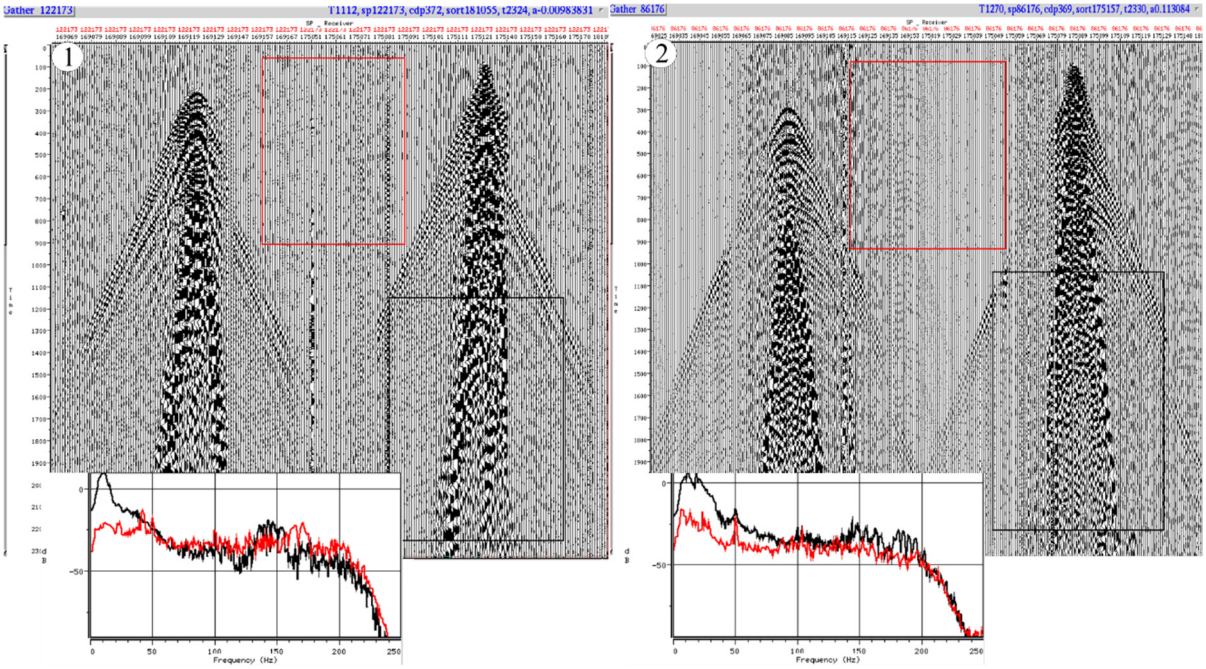


Fig. 4. Fragments of field seismograms with amplitude spectra of the corresponding windows: 1) explosive source; 2) impulsive source

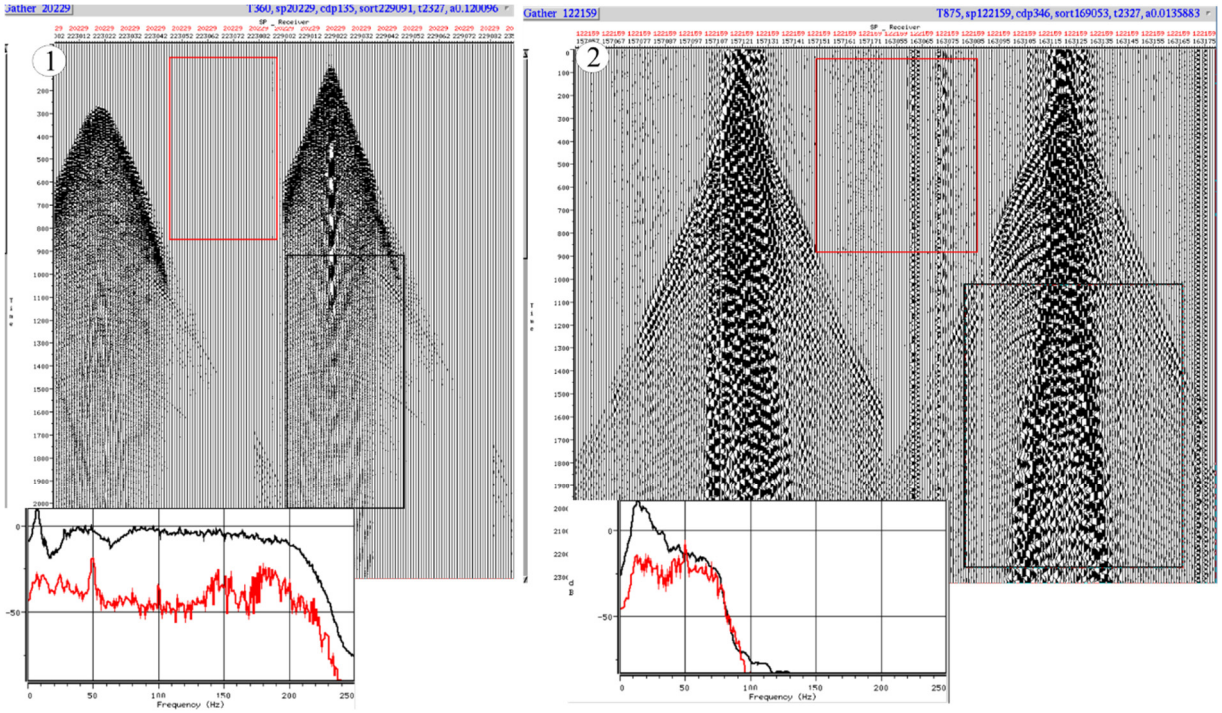


Fig. 5. Fragments of field seismograms with amplitude spectra of the corresponding windows: 1) acoustic source; 2) vibratory source

ISSN 1728-3817

To obtain a combined seismic cube, the most important processing task was to bring the seismic signals from all source types to a unified form, specifically to minimum phase (Abdolahi, Chehrazi, & Kadkhodaie, 2022; Russell, 1988; Veeken, & Da Silva, 2004). As noted earlier, four types of sources and three types of receivers were used in this area. From a theoretical standpoint, the signals from explosive and impulsive sources are similar and have a minimum-phase impulse shape, whereas the vibratory source produces a zero-phase signal, and the acoustic source generates a mixed-phase signal.

To convert the impulse from the vibratory source to a minimum-phase form, modeling was performed based on the available sweep-signal data (linear sweep in the 8–80 Hz frequency band, duration 10 s, taper 0.5 s) to generate a Klauder wavelet, for which a minimum-phase conversion filter was then calculated (Fig. 6). During the modeling, a conversion filter was successfully obtained; however, its subsequent application to real data proved ineffective, as the filter altered the signal phase inconsistently across frequencies. In contrast, using a minimum-phase filter over the frequency band of the sweep signal yielded better results, which is why this filter was ultimately chosen.

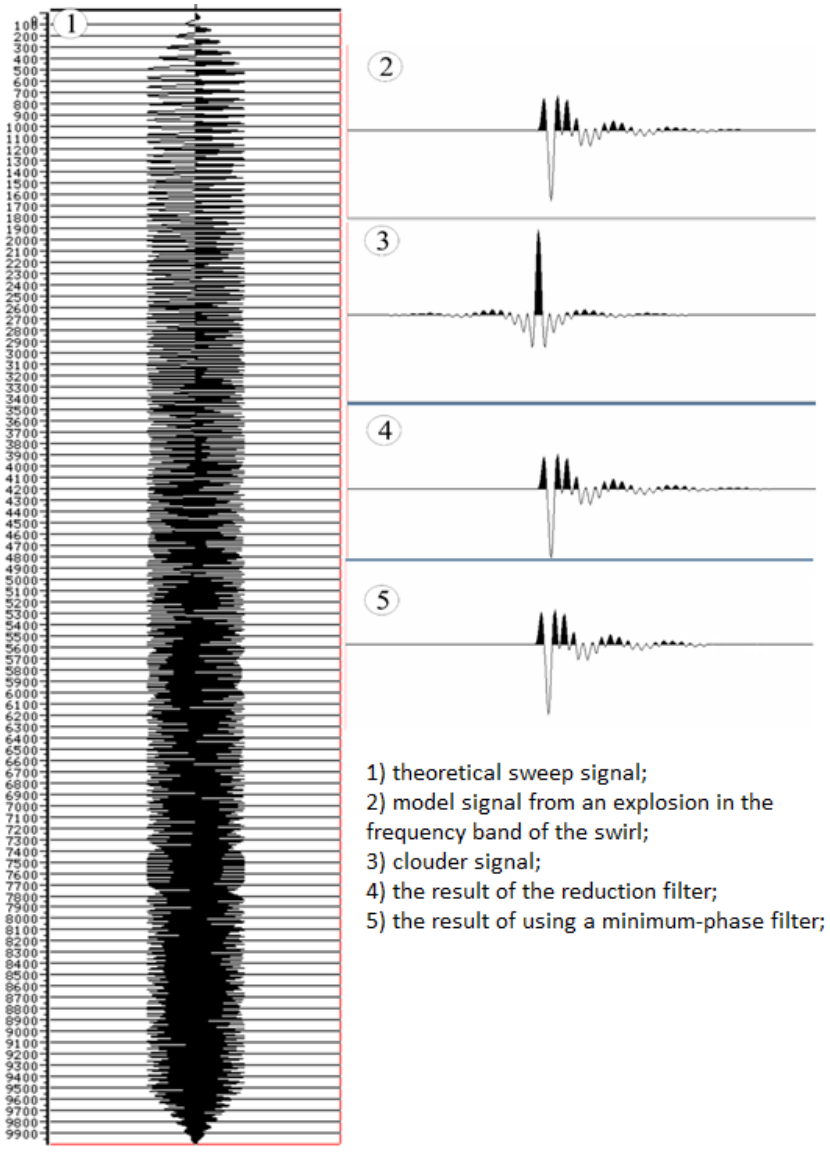


Fig. 6. Conversion of the vibratory source to a minimum-phase impulse form using modeling

The acoustic source has a mixed-phase signal characteristic. To convert it to a minimum-phase form, statistical deconvolution was applied, bringing the pneumatic gun signature to a unified minimum-phase equivalent (Russell, 1988; Veeken, & Da Silva, 2004). This procedure was carried out within a broad time window of W800–W2500 ms, with a noise factor of 1 % and an operator length of 400 ms.

Due to the use of different types of receivers in the area (geophones, hydrophones, and transition-zone receivers), a correction for non-identity was applied (Abdolahi, Chehrazi, & Kadkhodaie, 2022; Veeken, & Da Silva, 2004). For this purpose, amplitude and frequency maps of the signal were constructed. Based on the analysis of these maps and seismograms from different sources using various receivers, it was concluded that the signal frequency and phase do not depend on the type of receiver. The only difference was in amplitude, which varied across the area. This variation was corrected by applying a surface-consistent dynamic correction for both sources and receivers.

Discussion and conclusions

Due to the complex and difficult-to-interpret interference patterns in the intervals corresponding to the main target objects, it was decided to apply seismic inversion (Abdolahi, Chehrazi, & Kadkhodaie, 2022; Russell, 1988). This inversion, by removing interference effects, allows for a direct representation of geological objects on seismic sections (within the achieved resolution), while direct calibration of the PAC traces with well log data enables work at the level of reservoir elements, such as the top and bottom of the layer (Fig. 7). In other words, PAC inversion makes it possible to transition from a quasi-synchronous seismic time section to an approximate lithological section.

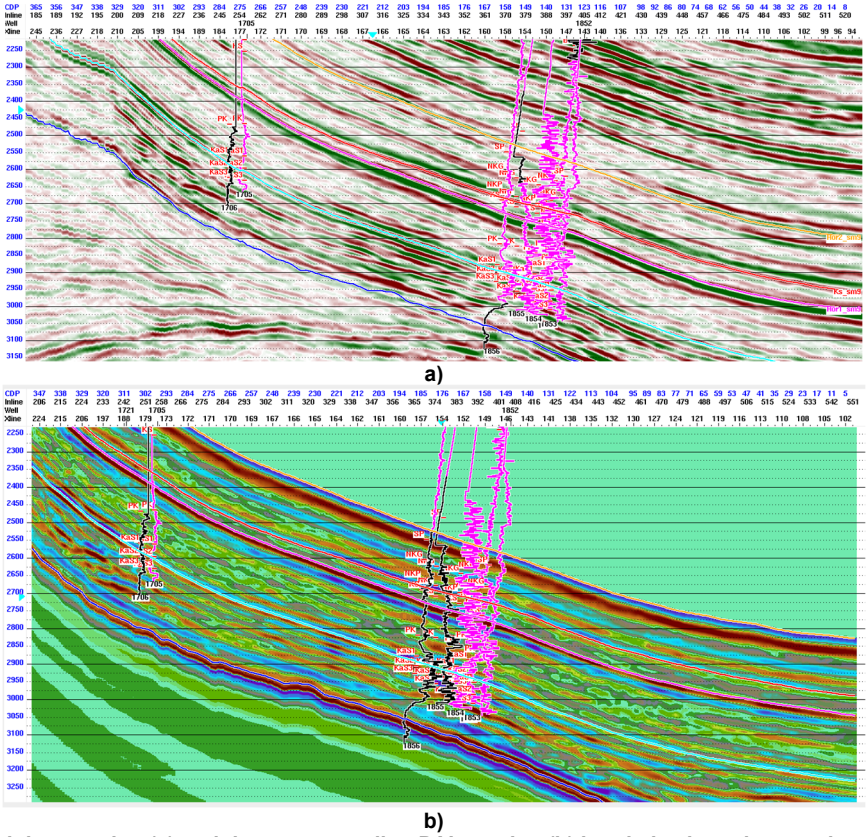


Fig. 7. Vertical time section (a) and the corresponding PAL section (b) in relative impedances along the traverse

The inversion was performed using the Hampson-Russell software suite in deterministic mode, which is based on the use of an a priori geological model. The key procedures in the inversion are the estimation of the "initial" signal and the construction of the a priori geological model. The signal estimation was carried out in two stages. In the first stage, seismic data were tied to the geological section. This tie was performed over a broad window encompassing the entire target interval. For the initial approximation, a zero-phase signal calculated from seismic data in the vicinity of Well 1856 using VSP data was used (Fig. 8). Signal estimation was performed only near Well 1856, where a complete set of well-log data required for accurate tying was available: VSP results, density, and acoustic logs. The final estimate of the "initial" impulse was taken as the signal shown in Fig. 8, characterized by a phase shift of 13°.

To construct the a priori geological model, the target interval is divided into thick layers with uniform layering characteristics (based on the pattern of filling reflections). This thick-layered model is used to transfer correlation across the inter-well space when building a 3D a priori model from well-log data. The resulting model serves as a framework for the actual inversion of seismic traces into pseudo-acoustic impedance. The degree to which the framework model influences the inversion is controlled by the corresponding parameters.

Figure 9 presents a comparison of vertical slices of the relative impedance cube along line 364 of the Govsan field. A detailed analysis of this cube slice shows that, in both sections, a pronounced decrease in acoustic impedance values is observed (Riahi, & Fakhari, 2022) at the level of the underlying PT deposits. This decrease is mainly associated with a sharp reduction in seismic wave velocities and densities, ranging from −110 to −2598 (m/s) × (g/cm³), within clayey deposits saturated with fluids, which is characteristic of zones with abnormally high formation pressures (AHFP (Riahi, & Fakhari, 2022; Sun et al., 2023). The existence of an AHFP zone is also confirmed by the results of vertical seismic profiling (VSP) conducted in two wells of the Govsan field (Ahmadov, 2019; Starostenko, Legostaeva, & Savchenko, 2014).

VSP (Vertical Seismic Profiling) surveys were successfully conducted in well 1856 in the summer of 2010 and in well 1867 in 2014 (Starostenko, Legostaeva, & Savchenko, 2014). The surveys were conducted in the cased Well 1856 (single and double casing) using impulsive sources, including a pneumatic chamber and the most advanced four-level VSP probe available at the time, the VSI-4. No significant problems were encountered during the field observations. The acquired data are of good quality and suitable for the objectives and tasks set for the VSP surveys.

ISSN 1728-3817

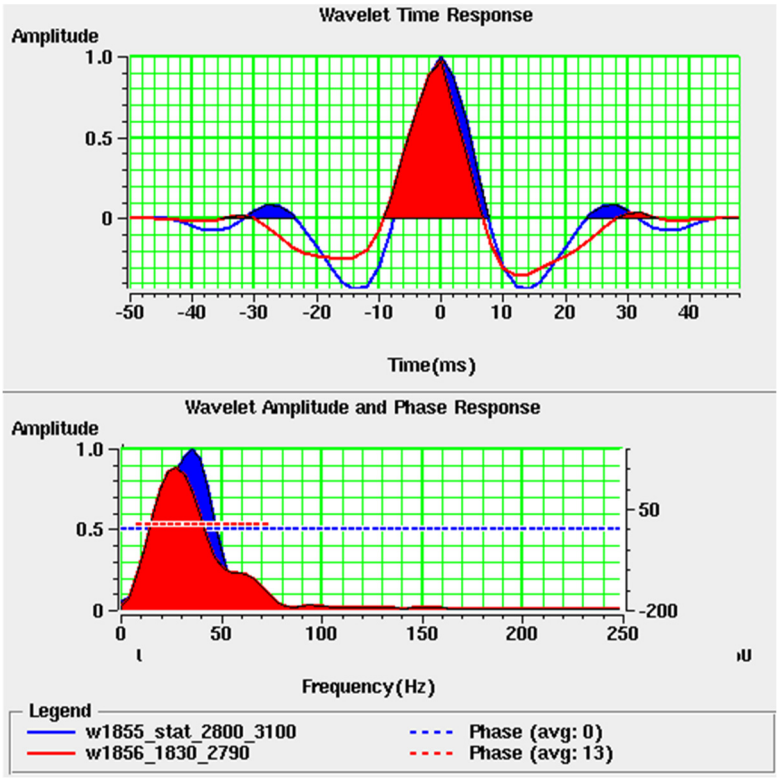


Fig. 8. Impulse estimates calculated near Well 1856: zero-phase (blue) and final (red)

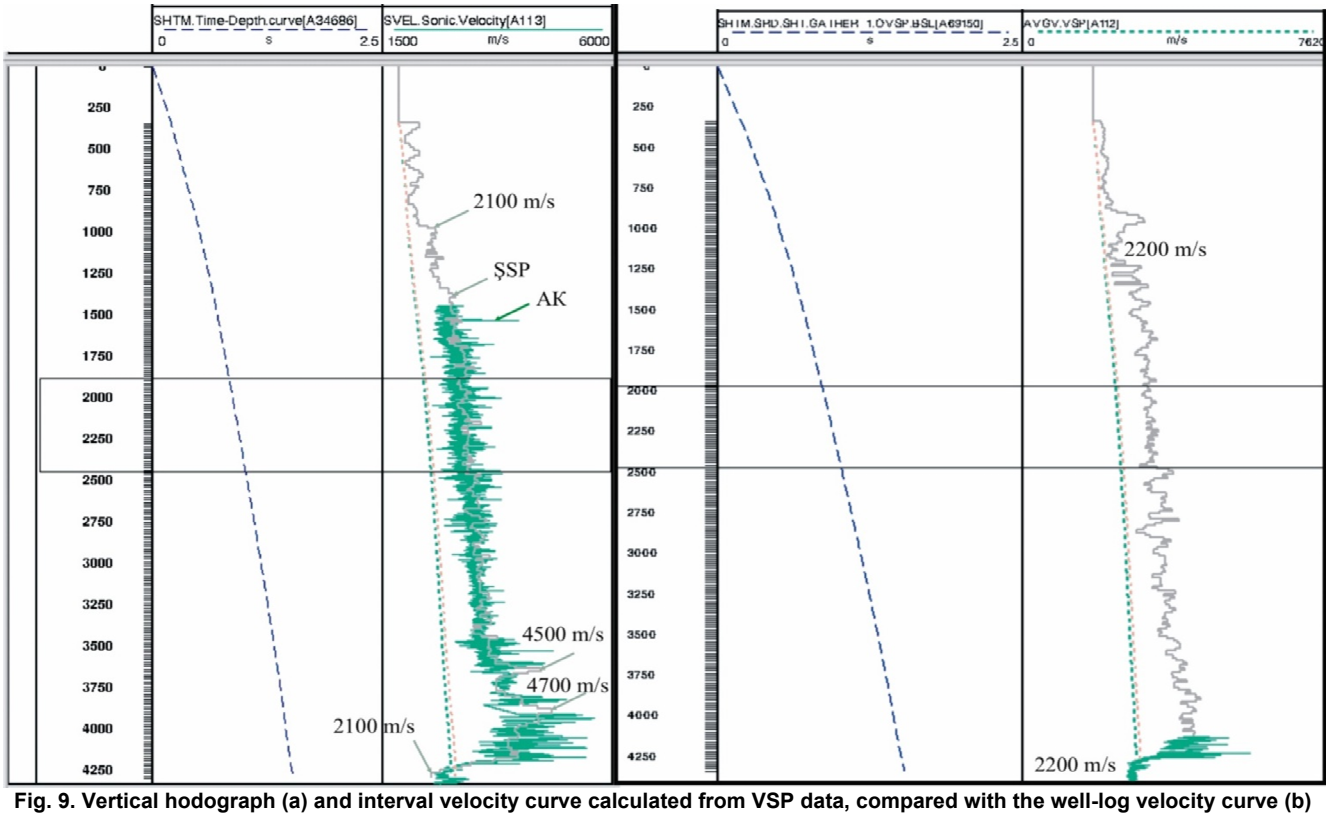


Fig. 9. Vertical hodograph (a) and interval velocity curve calculated from VSP data, compared with the well-log velocity curve (b)

During data processing, the most efficient multicomponent methodology was applied, which includes polarization analysis, calculation of projections, and parametric decomposition of wavefields. This approach enables simultaneous processing of all three recorded XYZ components, allowing the extraction of reflected scalar waves with the highest possible quality. The processed data were migrated, resulting in both time and depth VSP sections. The constructed models were successfully validated for structural dip and acoustic properties using the complete set of recorded VSP data. Therefore, the reliability and accuracy of the VSP results can be considered well substantiated. A joint analysis of the VSP sections and surface seismic data demonstrated a good level of consistency between them.

To predict velocities below the well bottom and to extend the depth–time relationship for estimating the depths of the most interesting reflecting horizons, it was decided to perform Pseudo-Acoustic Logging (PAL), also known as acoustic impedance inversion. The PAL was calculated based on the corridor stack of reflected waves from the VSP data. Since any inversion is a highly non-trivial process, numerous iterations of PAL with different inversion parameters were analyzed. The presented results are stable and consistent with the a priori information. For the PAL inversion, the dominant frequency range of the VSP data 5–70 Hz was selected.

It should be noted that the theory of PAL (Pseudo-Acoustic Logging) is developed for a one-dimensional medium: flat-layered structure, vertical well, and a VSP observation configuration corresponding to a vertical profile. These assumptions are not entirely accurate for Well H1867, which does not allow for a guarantee of 100 % reliability of the obtained data. Nevertheless, the results appear to be correct rather than false-synthetic (i.e., they do not exhibit uncharacteristic behavior, doubtful values, or inversion instability).

In addition, the recorded VSP and well-log data show a significant decrease in velocities in the lower part of the section, which also confirms the PAL results. The predicted P-wave velocity below the well bottom was used to calculate a predictive depth–time relationship, which, in turn, can be used to estimate the expected depths of the most interesting reflecting horizons below the well bottoms.

Without going into the detailed processing and interpretation of the VSP data, we note several important results of the well seismic surveys (Salmanov et al., 2023; Starostenko, Legostaeva, & Savchenko, 2014). Analysis of the velocity curves obtained from VSP and well-log data below the bottoms of the studied wells shows that, after a significant increase in interval velocities, a sharp decrease to approximately 2000 m/s is observed at greater depths, corresponding to a depth of about 1000 m (Fig. 9). A similar pattern is observed in both wells. In our view, this clearly indicates the presence of an AHFP (abnormally high formation pressure) zone at this field, associated with fluid accumulations in the underlying PS deposits. In our opinion, this clearly indicates the presence of an abnormally high formation pressure (AHFP) zone within the studied field, associated with fluid accumulations (Riahi, & Fakhari, 2022; Sun et al., 2023). Such abnormally elevated pressures arise as a result of reservoir sealing during burial, when formation fluids lose the ability to escape from the reservoir and thus prevent rock compaction under the increasing load of the overlying strata, i.e., lithostatic pressure. In effect, only a portion of the overburden weight is transmitted by the rock framework to the pore-filling fluid. Consequently, the rock experiences differential (effective) pressure corresponding to a somewhat shallower depth, and the seismic velocity within it corresponds to that reduced depth.

A one-dimensional Vp–Vs velocity model was constructed as the first-approximation 1D Vp–Vs model for parametric decomposition based on VSP data from wells No. 1856 and 1867. The constructed models were compared with slices extracted from the seismic inversion cubes, which demonstrated their complete consistency with respect to the AHFP zone.

As noted above, the Hovsan field is located in the southeastern part of the Absheron Peninsula and extends into the offshore zone of the Caspian Sea. In 2017, well No. 1870 was drilled targeting the underlying PT formations, where an abnormally high formation pressure (AHFP) zone was anticipated based on VSP data. Indeed, the wellhead pressure reached approximately ~800 atm, compared with the expected 400 atm. The well flowed uncontrollably for several days and was eventually suspended due to technical constraints.

Surface and well seismic studies made it possible to identify an AHFP (abnormally high formation pressure) zone in the Hovsan field section, which stratigraphically corresponds to the underlying PS deposits. Lithofacies-wise, these deposits consist of clay-rich formations with interbedded sands. These sand layers were not clearly visible on conventional seismic sections. However, seismic inversion of the 3D seismic data allowed these sand interbeds to be identified.

A key finding is that the AHFP zone is clearly distinguished in vertical sections of both absolute and relative pseudo-acoustic impedance. Thus, seismic inversion of 3D seismic data can be effectively used to predict the AHFP zone (Abdolahi et al., 2022).

A well drilled into Miocene deposits in 2015 confirmed these predictions, producing a flow of approximately 100 tons of oil per day, thereby further confirming the hydrocarbon potential of the underlying PS deposits within the studied field.

Authors' contribution: Tofik Ahmedov – conceptualization, methodology, writing (original draft), formal analysis; Amikishi Asadli – data curation, visualization, writing (review and editing); Goychek Tashviqi – investigation, validation, writing (review and editing).

Sources of funding. The authors declare the absence of external funding for the conduct of this study and preparation of the manuscript for publication.

References

Abdolahi, A., Chehrazi, A., Kadkhodaie, A., et al. (2022). Seismic inversion as a reliable technique to anticipating of porosity and facies delineation, a case study on Asmari Formation in Hendijan field, southwest part of Iran. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12, 3091–3104. https://doi.org/10.1007/s13202-022-01497-y

Abdullayev, N. R., Riley, G. W., & Bowman, A. P. (2012). Regional controls on lacustrine sandstone reservoirs: The Pliocene of the South Caspian basin. In O. W. Baganz, Y. Bartov, K. M. Bohacs, & D. Nummedal (Eds.), *Lacustrine sandstone reservoirs and hydrocarbon systems* (AAPG Memoir 95). American Association of Petroleum Geologists.

Aghayev, B. S. (2023). Operational forecasting of high-pressure zones in oil and gas wells. *Problems of Information Technology*, 14(1), 45–53. https://doi.org/10.25045/jpit.v14.i1.05

Ahmadov, T. R. (2019). The hydrocarbon bearing capacity of miocene reservoir units in the light of borehole seismic data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *2*(85), 46–50 [in Russian]. [Ахмедов, Т. (2019). Нефтегазоносность миоценовых отложений площади Зых-Говсан в свете данных скважинной сейсморазведки. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 2(85), 46–50]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.85.06

Ahmedov, T., Kerimova, K., & Khalilova, L. (2024). Three-dimensional geological modelling of the eastern and western parts of the Hovsan field according to geological and geophysical data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 46(4). https://doi.org/10.24028/gj.v46i4.310473

Akhmedov, T., & Khalilova, L. (2024). Structure and litho-facial features of the Qala suite deposits of the Zykh-Hovsan area according to 3D seismic and well logging data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(106), 19–27. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.03

Akhmedov, T., Khalilova, L., & Kerimova, K. (2024). Clarification of the genesis of deposits of Qala Suite of the Hovsan-Zykh area by methods of stratigraphic and lithofacies analysis based on 3D seismic and Well Logging data (Absheron oil and gas bearing region, Azerbaijan). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 33(2), 222–233.

Alguliyev, R., & Aghayev, B. S. (2024). Application of AHRP prediction technologies in drilling operations. *Proceedings of SOCAR Scientific Conference*, 95–100.

Bezrodna, I., & Vyzhva, S. (2019). Analysis of acoustic properties of reservoir rocks from Runovshchynska field on the basis of petrophysical studies in various pressure conditions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(86), 21–26 [in Ukrainian]. [Безродна, І., & Вижва, С. (2019). Аналіз акустичних властивостей порід-колекторів Руновщинської площі на основі петрофізичних досліджень у різних баричних умовах. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 3(86), 21–26]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.86.03

Burakhovych, T. K., & Korchagin, I. N. (2018). Integrated interpretation of seismic and gravimetric data in oil and gas prospecting. *Geodynamics*, 2(25), 95–104.

Leila, M., Yasser, A., El Bastawesy, M., & El Mahmoudi, A. (2022). Seismic stratigraphy, sedimentary facies analysis and reservoir characteristics of the Middle Jurassic syn-rift sediments in Salam Oil Field, north Western Desert, Egypt. *Marine and Petroleum Geology*, 136, 105466. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.105466

Mao, X., Gan, R., Wang, X., Cheng, Z., Yu, P., Zheng, W., Song, X., & Xiao, Y. (2025). Prediction of three pressures and wellbore stability evaluation based on seismic inversion for Well Huqian. *Processes*, 13(9), 2772. https://doi.org/10.3390/pr13092772

Riahi, M. A., & Fakhari, M. G. (2022). Pore pressure prediction using seismic acoustic impedance in an overpressure carbonate reservoir. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 12, 3311–3323. https://doi.org/10.1007/s13202-022-01524-y

Russell, B. H. (1988). *Introduction to seismic inversion methods*. SEG Geophysics Reprint Series, 22, 1–15.

Salmanov, A., Maharramov, B., Garagozov, K., & Karimov, N. (2023). *Geology and indicators of development of oil and gas deposits in the onshore territory of Azerbaijan*. MSV LLC [in Azerbaijani]. [Salmanov, A., Məhərrəmov, B., Qaragözov, K., & Kərimov, N. (2023). Azərbaycanın quru ərazisində neft və qaz yataqlarının geologiyası və işlənməsinin göstəriciləri. Sorğu kitabı, Bakı, "MSV" MMC nəşriyyatı, 624 s.].

Seidov, V. M., & Khalilova, L. N. (2023). Sequence stratigraphic analysis of the Galmaz field based on well logging data. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(2), 360–370. https://doi.org/10.15421/112333

Starostenko, V. I., Legostaeva, O. V., & Savchenko, A. S. (2014). Velocity model construction based on VSP and seismic data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36(6), 89–102.

Sun, Y., You, X., Xue, J., et al. (2023). Characteristics of abnormal pressure and its influence on deep and ultra-deep tight reservoirs in the Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(2), 350–365.

Veeken, P. C. H., & Da Silva, M. (2004). Seismic inversion and reservoir characterization: A practical workflow for seismic reservoir characterization. *First Break*, 22(7), 47–56.

Xing, X., Zhou, C., He, Y., Zhang, K., Du, T., Gong, B., & Huo, K. (2024). Pore pressure pre-stack seismic prediction method of complicated reservoirs based on formation compaction trend ratio. *Progress in Geophysics*, 39(6), 2298–2305.

Отримано редакцією журналу / Received: 06.01.26
Прорецензовано / Revised: 07.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Тофік АХМЕДОВ, д-р наук (геологія та мінералогія), проф.
ORCID ID: 0000-0003-0634-5600
e-mail: ahmedovtofiq47@gmail.com
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан

Амікіші АСАДЛИ, докторант
ORCID ID: 0009-0003-0711-8028
e-mail: amikishiasadli@gmail.com
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан

Гойчек ТАШВІКІ, докторант
ORCID ID: 0009-0002-4256-0949
e-mail: goycek.tesviqi@gmail.com
Інститут геології та геофізики Міністерства науки і освіти Азербайджанської Республіки, Баку, Азербайджан

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗОН АНОМАЛЬНО ВИСОКОГО ПЛАСТОВОГО ТИСКУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ 3D СЕЙСМІЧНОЇ ІНВЕРСІЇ

Вступ. ***У статті наведено відомості про розташування досліджуваного родовища Говсан, історію його вивчення різними геологічними та геофізичними методами, а також основні отримані результати. Зазначається, що дослідження цієї території розпочалося ще у XIX ст. із прилеглого району Сурахани–Карачухур, де було пробурено першу розвідувальну свердловину (район Карачухур). У 1930–1940-х рр. у межах досліджуваної території також проводилися різні геофізичні дослідження, і в результаті електророзвідки було отримано перше уявлення про тектоніку Біна-Говсанської синкліналі. Дані газозйомки згодом дали змогу виявити аномальні зони в межах родовища Говсан. Сейсмічні дослідження проводилися з 1930-х до середини 1950-х рр. методом відбитих хвиль (RM), а у 1977–1978 рр. – методом спільної глибинної точки (CDP). Окремі сейсмічні профілі було отримано у 1993 та 1999 рр. Детальні дослідження методом CDP виконувалися у 1996 та у 2003–2004 рр. У 1948 р. в свердловині №1308 у калінській світі продуктивної товщі було відкрито нафту, після чого родовище Говсан було введено в промислову експлуатацію. Нині родовище розробляється лише на суші, оскільки його морські межі залишаються невизначеними через недостатню вивченість.***

Методи. ***У 2011–2012 рр. у районі Зих–Говсан було проведено 3D-сейсмічні дослідження методом CDP. Роботи виконувалися за різноманітних приповерхневих сейсмо-геологічних умов і охопили площу 70 км². Наведено інформацію щодо польових робіт: у цій зоні використовувалися чотири типи джерел сейсмічної енергії та три типи приймачів. Під час польових робіт не було належним чином виконано узгодження джерел, що спричинило труднощі при обробці даних. Крім того, калібрування приймачів було проведено лише частково, що також ускладнило обробку. Особливу увагу приділено застосуванню сейсмічної інверсії.***

Вертикальне сейсмічне профілювання (VSP) було успішно проведено у двох свердловинах родовища Говсан: № 1856 та № 1867. Наведено коротку інформацію про свердловинні дослідження та обробку отриманих даних.

Результати. ***Отримано результати псевдоакустичної інверсії (PAC-інверсії), а також проведено порівняння вертикальних розрізів кубів абсолютного та відносного акустичного імпедансу вздовж одного з профілів 3D-зйомки родовища Говсан. Показано, що в обох розрізах на рівні підстильних відкладів продуктивної товщі (PS) спостерігається різке зниження значень акустичного імпедансу. Це зниження головним чином пов'язане з різким зменшенням швидкостей сейсмічних хвиль і густини – від 110 до 2598 (м/с)×(г/см³) –у глинистих, насичених флюїдом породах, характерних для зон аномально високого пластового тиску (АВПТ).***

Наявність зони АВПТ також підтверджується результатами VSP, отриманими у двох свердловинах родовища.

Наземні та свердловинні сейсмічні дослідження дали змогу виявити зону АВПТ у розрізі родовища Говсан. Стратиграфічно інтервал АВПТ охоплює підстильні відклади продуктивної товщі, які літологічно представлені глинистими відкладами з прошарками пісків. Ці піщані прошарки не відображалися на традиційних сейсмічних розрізах. Однак інверсія 3D-сейсмічних даних дозволила їх виділити.

Висновки. ***Важливим висновком є те, що зона АВПТ чітко виділяється на вертикальних розрізах як абсолютного, так і відносного акустичного імпедансу. Отже, можна стверджувати, що сейсмічна інверсія 3D-сейсмічних даних може бути використана для прогнозування зон АВПТ.***

Свердловина, пробурена у міоценових відкладах у 2015 р., підтвердила наші припущення та дала приплив близько 100 тонн нафти на добу, що додатково підтверджує нафтогазоносний потенціал підстильних відкладів продуктивної товщі в межах досліджуваної території.

Ключові слова: ***нафтогазоносність, сейсмічна інверсія, сейсмічний розріз, VSP, міоценові відклади, 3D-сейсмічна зйомка.***

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 550.552.53.553
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.03

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

Ivan VIRSHYLO, PhD (Geol), Assoc. Prof.
e-mail: virshylo@gmail.com
ORCID ID: 0000-0003-1285-5308
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine

DISTRIBUTION OF THE TEMPERATURE FIELD IN A WELLBORE AND SURROUNDING ROCKS AFTER COMPLETION OF LOGGING

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

Background. *The possibilities of using well geophysical logging data to assess the zone of wellbore influence on the temperature field of formations in the near-wellbore space are considered. The study is based on the results of interpretation of geophysical logging data from a well drilled within the Solotvyno Depression of the Transcarpathian Trough.*

Methods. *The thermophysical properties – thermal conductivity and heat capacity – of rocks of different composition and genesis within the well section were calculated. Maxwell's equation was used to calculate the thermal conductivity. The value of the thermal conductivity of the fluid filler was calculated based on the additive effect of individual components: formation water and gas. Using classical equations, namely the Fourier equation describing radial heat-flow propagation from the wellbore and the heat-capacity equation, the radial heat-flux density and the extent (depth) of the zone of significant wellbore influence on the temperature distribution in the near-wellbore space were determined.*

Results. *The effect of the shut-in time after cessation of drilling-fluid circulation on temperature changes in the wellbore, the radial heat-flux density, and the extent of the wellbore influence zone was investigated. With increasing time after well shutdown (downtime, or relaxation time), the relative error in estimating the true formation temperature relative to the measured temperature in the well decreases sharply. The new approach in calculations is that the temperature distribution around the well is represented by analogy with the formation of a drilling fluid filtrate invasion zone. The largest gradient in error reduction occurs during the first two days after the circulation of the flushing fluid in the well is stopped. It was established that, in addition to the thermophysical parameters of the formations, the substantial variability of the wellbore diameter should be taken into account when calculating the current formation temperature in the well.*

Conclusions. *An express method is proposed for calculating the radial heat-flux density and the extent (depth) of the zone of significant wellbore influence on the temperature distribution in the near-wellbore space. The proposed calculations make it possible to assess the parameters of wellbore impact on rock temperature in the radial direction at different times after termination of drilling-fluid circulation.*

Keywords: *wellbore, geothermal gradient, temperature, Fourier equation, thermal conductivity, rock, heat flux*

Background

Study of the geothermal gradient distribution as a function of depth for a specific section of the earth's crust is usually performed in two ways.

The first is calculated, when the values of the layer temperature at certain depths are known. But, still, it is impossible to do without temperature measurements at individual points of the well. Such measurements are performed in wells in which all work has been stopped for a long period. Without such measurements, approximate values of the thermal gradient are calculated based on heat flux density maps using the well-known Fourier equation. Such maps are available in works (Baysarovych, Mitropolsky, & Chupryna, 2000; Gordienko et al., 2002), thanks to which it is possible to approximately estimate the average value of the geothermal gradient for any section of the territory of Ukraine.

The second method requires direct temperature measurement by thermal logging equipment throughout the depth of the well, provided that it is in a "resting" state for a long time, i.e. without work in the wellbore, without circulation and mixing of the flushing fluid. The necessary standards for settling time for such a well will be considered later. Unfortunately, such studies with compliance with time requirements are not performed often, rather "episodically", which leads to the use of the "analogies" method when assessing the temperature distribution of rocks in a specific area where there are no direct measurements of the geothermal gradient.

Assessing the influence of a real well and its individual sections on the distribution of the thermal field in the near-well space at different time intervals after thermal logging is an important task both in practical and theoretical aspects.

In the work (Dang et al., 2024) it was investigated how the design features of the drill string, the configuration of the channels of the movement of the mud and the flow regime affect the value of the convective heat transfer coefficient. Based on the comparison with the well-logging data of two ultra-deep wells of the Shunbei block (China), the deviation of the calculated temperature at the bottom did not exceed 2 %. The work analyzed the main factors and patterns of the formation of the temperature regime in the annulus. It was established that a decrease in the temperature at the bottom is observed with a decrease in the temperature of the drilling mud at the inlet, as well as its thermal conductivity and the thermal conductivity of the drill pipe. In contrast, a decrease in the flow rate, density, viscosity and heat capacity of the drilling mud leads to an increase in the bottomhole temperature. It was shown that the temperature of the mud at the inlet is a determining factor that affects the temperature at the outlet, while the heat capacity of the drill string is of secondary importance for the temperature regime in the annulus. The results obtained form a reliable tool for predicting the temperature field in ultra-deep inclined directional wells of the Shunbei block and can be used in thermally controlled drilling. Other works (Beier, 2020; Beier, 2024; Waples, Pacheco, & Vera, 2004) are devoted to the

© Karpenko Oleksii, Virshylo Ivan, 2026

ISSN 1728-3817

results of temperature measurements in deep wells, in particular hydrothermal ones, in order to estimate the geothermal gradient and take into account/correct the well and near-surface measurement conditions in numerical calculations. It should be noted that these works present certain approaches to making corrections when measuring the temperature in the well in order to obtain reliable values of the geothermal gradient.

In the work (Beier, 2020), the authors considered a model of unsteady heat transfer for a coaxial well, taking into account the geothermal gradient characteristic of deep wells. The analytical solution was obtained using Laplace transform methods with subsequent numerical inversion in real time. The model was verified by comparison with measured vertical temperature profiles in the well, as well as with temperature profiles from previous numerical simulations. This work noted that the lack of information about the real values of the thermal conductivity of rocks leads to significant errors in modeling the geothermal gradient.

Based on the results of research by many specialists, algorithms for numerical modeling of temperature redistribution during flushing with a flushing fluid, performing various technical energy balances, the authors built a numerical model of unsteady heat transfer between the wellbore and the surrounding rock massif. The adequacy of the model was confirmed by operations, as well as after a long downtime of the well. At the same time, the process of formation and the dimensions of the thermal/temperature transition zone in the radial direction from the well wall are not sufficiently described. It also remains an important question how the radial heat flux density changes with time after the well is stopped. These processes can be studied using various numerical modeling approaches. This article considers a fairly simple method that allows evaluating all the listed changes in the distribution of thermal energy around the well. The practical application of such an approach will be described later in this article.

The most interesting and important from the point of view of practical use and scientific research was to investigate how the area or zone of influence of the well on rocks is distributed in terms of changing their natural thermal field, in particular, under the influence of the time factor. This will allow in the future to use the results obtained to predict the magnitude of the geothermal gradient based on the use of well thermometry data during complex geophysical studies, in addition, to clarify the necessary time for settling the well in a non-working state in order to obtain the actual temperature characteristics of rock layers based on the results of thermal logging.

The object of the study is the geological environment and its geothermal characteristics within the Solotvyn Basin of the Transcarpathian Trough. In particular, the Neogene-Paleogene and Mesozoic sediments of the Solotvyn Basin of the Transcarpathian Trough. In tectonic terms, the Solotvyn Basin is located in the southeastern part of the Transcarpathian Trough, separated from the neighboring Chop-Mukachiv Basin by the Vygorlat-Hutyn Volcanic Range. Other adjacent geological structures are the Folded Carpathians from the north and northeast, the Pannonian Basin – from the south and southeast. In the structure of the Solotvynska depression, two structural floors are mainly distinguished: the upper one is Neogene, composed of molasse deposits, and the lower one is Paleogene-Mesozoic, often called the basement. In lithological terms, the sections of the sedimentary cover, which are exposed by wells, are mainly of terrigenous composition. However, in some areas, the rocks are represented by effusive rocks – tuffs and tuff sandstones, conglomerates (Tereshkulska formation), limestones and marls. As for evaporites, in the section of the Solotvynska depression, halite deposits in the upper Tereblya subsuite are typical. Such a motley ensemble of rocks of different composition and genesis creates a rather difficult task of identifying sediments in well sections according to logging data (Karpenko, Virshylo, & Chupryna, 2024). However, according to the data of geophysical well studies obtained in different years of research of the Solotvyno gas field using the results of core material studies, petrographic, hydrogeological studies, lithological dissection of well sections was performed, and the main lithological and reservoir parameters of rocks were assessed (Fig. 1).

Methods

The objective of this study was to investigate the influence of various factors on the formation of a zone of change in thermal characteristics (primarily temperature) in the near-well space after the work stoppage in a well that is still in the drilling stage. The geological section of the Solotvyno gas field provides an opportunity to assess the inflow of rock layers, composed, as indicated above, of terrigenous, carbonate, volcanogenic and evaporite formations.

For further studies, in accordance with the tasks set, the thermophysical characteristics of rocks were calculated based on their lithological and reservoir parameters. The Maxwell equation was used as the most universal and widely used to calculate the thermal conductivity (Fuchs, Balling, & Forster, 2015; Kiradjiev et al., 2019). The value of the thermal conductivity of the fluid filler was calculated based on the additive effect of individual components: formation water and gas. The gas saturation coefficient was determined based on the results of quantitative interpretation of GDS data, test results only for sandstone, siltstone, tuff and tuffite reservoirs.

Petrophysical constants of thermal conductivity for individual rock components – the solid part of the skeleton, the clay part, mineralized formation water and natural gas were used from reference data (Fuchs, Balling, & Forster, 2015; Kobranova, 1986; Physical Properties..., 1984). Table 1 shows the statistical characteristics of the thermal conductivity of rocks from the well sections of the Solotvynska depression based on the results of quantitative calculations (Maxwell's equation).

It should be noted that the differentiation in the value of the thermal conductivity of rocks in the section is quite significant: the largest values, as expected, correspond to evaporite rock – halite – 5,5 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. In second place are sandstones, which have significantly higher values of the parameter in comparison with other terrigenous, carbonate and magmatic rocks (Table 1). The lowest values are in shale, tuffs and tuffites. Thus, in shale – 1,9 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ on average, in tuffs and tuffites – 2,3, 2,2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ respectively. Such a distribution of values, as will be shown below, noticeably affects the distribution of the temperature field characteristics in the well and the near-well space.

Similar calculations were performed to determine the heat capacity of rocks. According to the general scheme/algorithm for estimating the heat capacity, the calculation of a multicomponent environment is determined by the additive model (Kobranova, 1986; Physical Properties..., 1984). Here, the contribution of each component is taken into account as the volume or mass content of each component in the rock. As in the calculation of thermal conductivity, petrophysical constants of heat capacity for individual rock components – the solid part of the skeleton, the clayness, mineralized formation water and

natural gas were used from reference data (Fuchs, Balling, & Forster, 2015; Kobranova, 1986; Physical Properties..., 1984). It is known that anomalous heat capacity is characteristic of water. Therefore, the water content, and for gas-unsaturated rocks – porosity, is a determining factor in increasing the heat capacity of the rock.

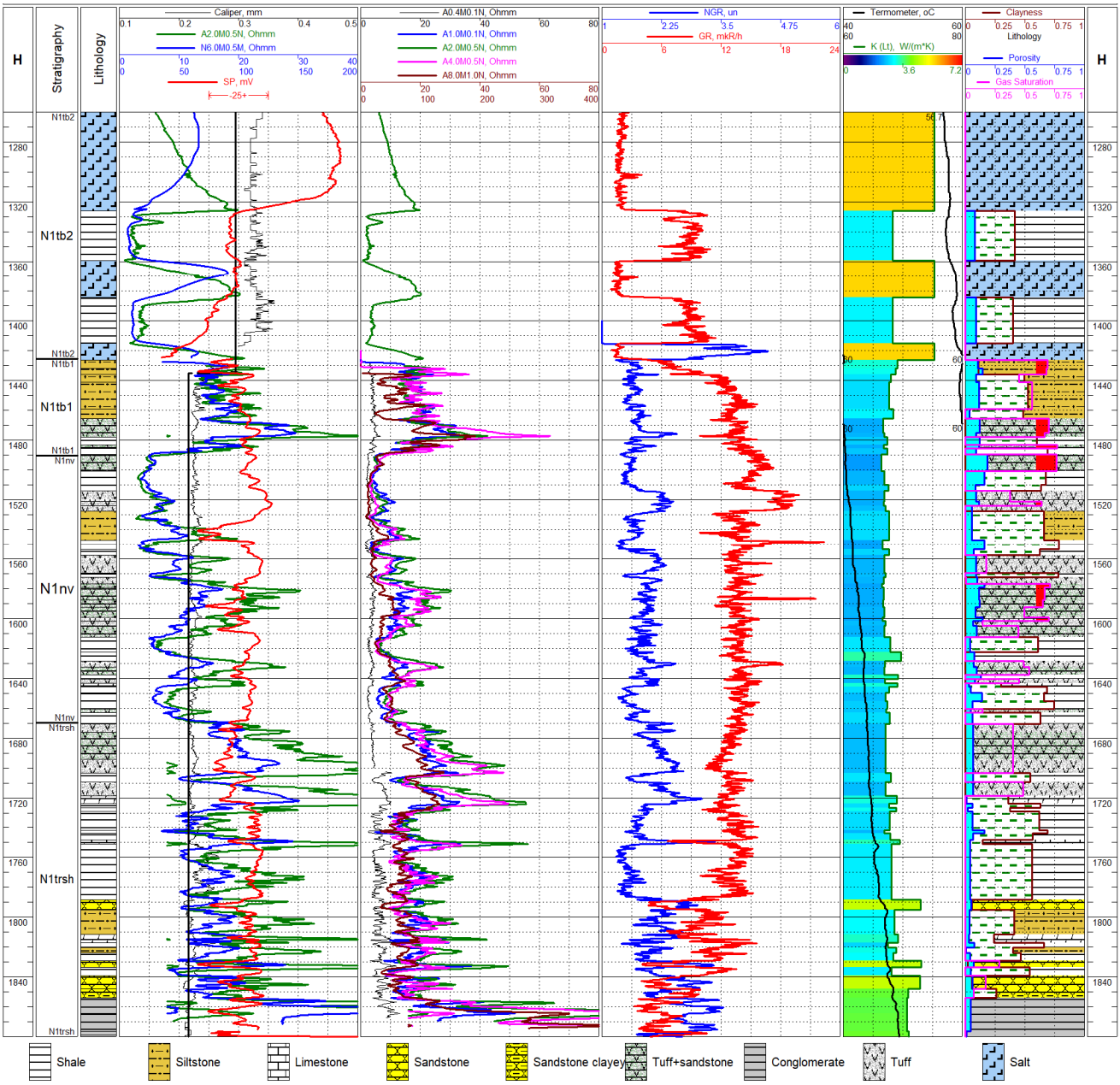


Fig. 1. Fragment of the well section of the Solotvynska area with lithological, geophysical and reservoir characteristics of rocks

Table 1

Statistical characteristics of thermal conductivity of rocks from well sections of the Solotvynska depression

Lithology	Thermal conductivity value, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)					
	Valid N	Mean	Median	Minimum	Maximum	Std.Dev.
Intrusive rock	25	2,9	2,9	2,8	2,9	0,02
Limestone	18	3,1	3,2	2,2	3,6	0,40
Marl	7	2,6	2,5	2,4	3,2	0,28
Conglomerate	31	3,3	3,5	2,4	3,9	0,50
Sandstone	34	3,6	3,6	1,8	4,4	0,48
Sandstone clayey	34	3,0	2,9	2,4	3,7	0,37
Shale	170	1,9	1,9	1,4	2,3	0,15
Siltstone	138	2,6	2,6	1,9	3,1	0,24
Salt	17	5,5	5,5	5,5	5,5	0,00
Tuff	60	2,3	2,3	1,9	2,6	0,20
Tuffities	73	2,2	2,2	1,5	2,8	0,29

ISSN 1728-3817

In addition to data on the quantitative characteristics of the distribution of rocks along the well section (intervals of occurrence of individual layers), rock thickness, heat capacity and thermal conductivity, thermal logging curves (along the entire well section) were also used during the last geophysical research of the well, as well as data on the typical heat flux density within the Solotvyn basin and point temperature measurements in a well stopped for a long time.

The issue of temperature distribution in a well during drilling operations, oil or gas production has been considered in numerous articles by researchers (Beier, 2020, 2024; Dang et al., 2024; Waples, Pacheco, & Vera, 2004), etc. It should be noted that there are theoretical calculations regarding the downtime from the moment of well stoppage in order to measure the temperature along the wellbore, which corresponds to the temperature of rocks in their natural state, for example, (Rezvanov, 1982). Usually, a period of at least 10 days from the time of well stoppage is recommended so that its temperature does not differ by more than 0,5°C (K) from the natural temperature of the strata (Rezvanov, 1982).

The thermal field in a deep well during drilling is formed as a result of the combined action of natural and man-made factors that vary in space and time. The basic background is the geothermal regime of the subsoil, which is determined by the geothermal gradient, thermal conductivity of rocks and regional heat flow. In an undisturbed state, the temperature increases almost linearly with depth, but drilling disrupts this balance, creating a non-stationary thermal field around the wellbore.

An important source of thermal disturbances is the mechanical operation of the drilling tool. The friction of the bit against the rock, the destruction of the rock massif and the operation of the downhole motor or turbodrill are accompanied by the release of a significant amount of heat directly on the face. This leads to a local increase in temperature, especially in the intervals of hard and abrasive rocks, where the specific energy consumption of drilling is maximum.

A significant role in the formation of the temperature regime is played by the drilling fluid, which circulates in the system "pump – drill string – bottom hole – annulus". The temperature and thermophysical properties of the solution, its flow rate and flow regime determine the intensity of heat exchange between the walls of the well, drill pipes and surrounding rocks. During the circulation process, the drilling fluid simultaneously removes heat from the bottom hole and warms up due to contact with hot deep rocks. Basically, the temperature of the drilling fluid at the time of entry into the well is significantly lower than the temperature of deep-lying rocks.

A significant role in the formation of the temperature regime is played by the drilling fluid, which circulates in the system "pump – drill string – bottom hole – annulus". The temperature and thermophysical properties of the solution, its flow rate and flow regime determine the intensity of heat exchange between the walls of the well, drill pipes and surrounding rocks. During the circulation process, the drilling fluid simultaneously removes heat from the bottom hole and warms up due to contact with hot deep rocks. Basically, the temperature of the drilling fluid at the time of entry into the well is significantly lower than the temperature of deep-lying rocks.

No less important is the heat exchange between the well and the mountain massif, which is predominantly non-stationary in nature. After the start of drilling and especially after circulation stops, the temperature in the well tends to restore the natural geothermal profile. The speed of this process depends on the thermal conductivity of the rocks, the duration of drilling in the interval and the geometry of the well, in particular its diameter and the presence of casing.

Additional thermal effects may be associated with phase and physicochemical processes in the well. These include heat released or absorbed during clay hydration, salt dissolution, fluid degassing, and formation of gas throttling. The combined effect of these factors results in a complex, spatiotemporal nature of the thermal field in a deep well, which must be taken into account when interpreting temperature measurements and modeling thermal processes during drilling.

To conduct research, it was necessary to have two temperature curves along the well section: one during the last logging, the second curve corresponding to the temperature of the formations in their natural state. Typically, temperature curves of the natural thermal field are not often recorded, because keeping the well in a non-working state for at least 10 days is quite often an irrational operation. To obtain such a curve (also called the "temperature gradient" curve), calculations were performed based on the results of the interpretation of geophysical surveys in the well and the known average heat flux of 82 mW·m-^{2}. Based on the well-known Fourier equation (Fuchs, Balling, & Forster, 2015; Rezvanov, 1982) using data on the thermal conductivities of individual rock layers and the calculated values of the local geothermal gradient for each layer, a curve of natural temperature change *T_rocks* along the well section was constructed (Fig. 2). This figure also shows the temperature change curve along the wellbore *T_well*, which was recorded during the final comprehensive logging. The difference *ΔT* is the temperature drop in the well due to the impact of drilling operations and the circulation of the flushing fluid during the well flushing process before logging:

$$\Delta T = T_rocks - T_well. \quad (1)$$

The real temperature equalization time, when *ΔT* approaches 0 (denoted as *ΔTo*), as noted earlier, is estimated by various sources to be at least 10 days (864,000 s).

The theoretical basis for calculating the *ΔT/T_rocks* ratio, taking into account the thermophysical characteristics of the medium, the well, the well diameter and the "relaxation" time (restoration of the natural temperature) is described in a number of publications, for example (Rezvanov, 1982). In the work (Rezvanov, 1982) the results of such calculations for practical use are presented in the form of a graph-nomogram *α = ΔT/T_rocks = f(t, Db*) – the error in determining the temperature of rocks depending on the well downtime *t* and the well diameter *Db*. The ensemble of curves of the graph was approximated (Rezvanov, 1982, Fig. 98) by an equation that takes into account the change in time and well diameter in a wide range of values. The results of the temperature curve calculations were performed according to the equation:

$$T(t) = T_well + \Delta To \cdot (1 - \alpha). \quad (2)$$

The approximation of well temperatures is observed in the direction of true natural temperatures with increasing relaxation time, shown in Fig. 2. It is clearly seen that the maximum rate of "relaxation", or temperature equalization, is observed during the first few days.

The following Fig. 3 shows the calculated dependences *α = f(t)* and *α = f(Db)* for typical well characteristics.

It is clearly seen (Fig. 3) that with increasing time that has passed since the well was stopped (downtime, or relaxation time), the relative error in estimating the true temperature of the formations relative to the measured temperature in the well decreases sharply. The largest gradient in the decrease

in the error occurs during the first two days after the circulation of the flushing fluid in the well is stopped. The influence of the well diameter is also a significant factor affecting the relaxation rate. It is quite natural that an increase in the well diameter leads to a slowdown in the temperature recovery in the well. This is due to the anomalous thermophysical properties of water in the flushing fluid - the heat capacity of water is significantly, 5-6 times greater than that of the rocks that make up the well section. Thus, under normal conditions, water has a heat capacity Cm = 4,18 kJ·kg^{-1}·K^{-1}, quartz has a heat capacity of 0,7–0,8 kJ·kg^{-1}·K–1, and rocks have a heat capacity of 0,7–1,1 kJ·kg^{-1}·K^{-1} (Kobranova, 1986; Physical Properties..., 1984).

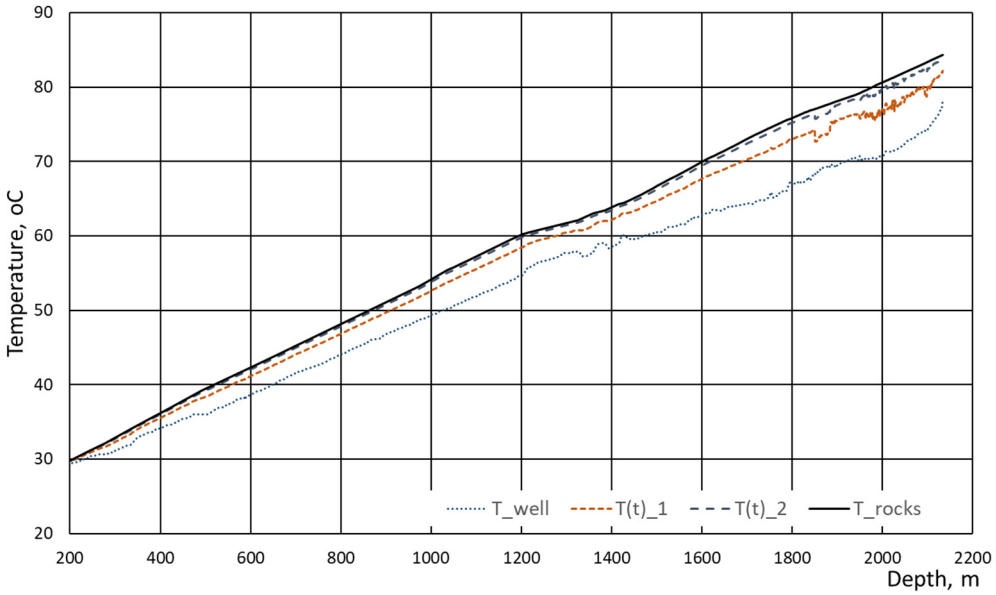


Fig. 2. Temperature distribution curves as a function of depth at different time intervals after the end of the circulation of the flushing fluid in the well: T_well – 0 days; T(t)_1 – 0.5 days; T(t)_1 – 2.0 days; T_rocks – >10 days. Explanation in the text

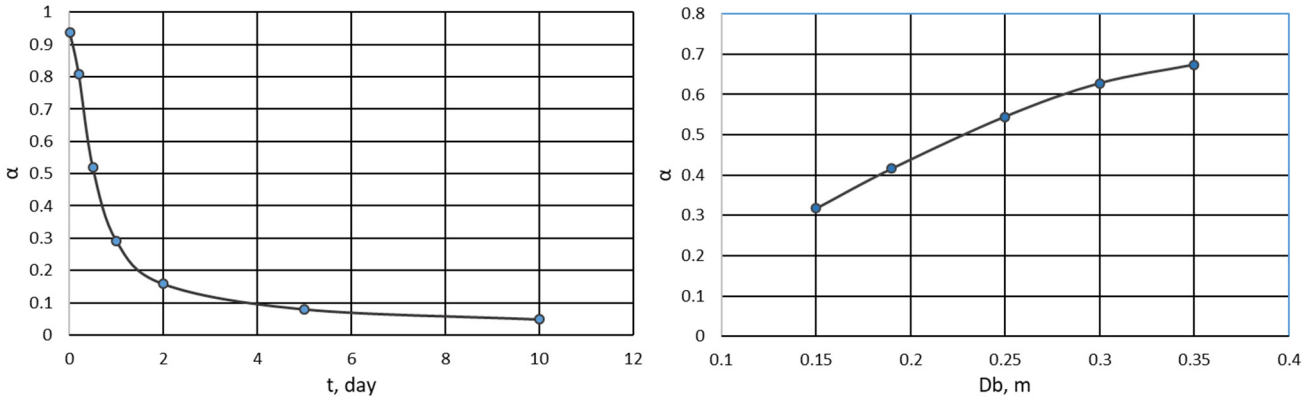


Fig. 3. Change in coefficient *α = ΔT/T_rocks* depending on: relaxation time t, graph on the left (Db = 0,237 m); well diameter Db, on the right (t = 0,5 days)

Results

After assessing the influence of the temperature recovery time in the well and the influence of the well diameter on this process, an attempt to calculate the distribution of the thermal field in the near-well space was made.

The model calculations are based on two classical equations that relate the thermophysical properties of rocks to the distribution of heat and the magnitude and direction of the heat flux density: the Fourier equation and the heat capacity equation. Let us make a model assumption that the decrease (or increase) of temperature around the well in the formation can be significant (noticeable) at a distance *L* (m) in the radial direction, by analogy with the process of filtration of the washing fluid into the reservoir during drilling. This distance is called the radius of penetration of the washing fluid filtrate (Fig. 4):

1. Fourier equation describing the distribution of heat flux in the radial direction from the wellbore:

$$\frac{Q}{\pi \cdot 2 \cdot R \cdot h} = k \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot t, \qquad (3)$$

where *Q* is the amount of heat, J, which forms in the near-wellbore formation space the temperature difference between the temperature *T_rocks* and the temperature in the well *T(t)*; *R* is the well radius, m; *h* is the formation thickness, m; *k* is the thermal conductivity of the formation, J·s^{-1}·m-^{1}·K^{-1}; *t* is the temperature relaxation time from the moment of well stoppage, s.

2. Heat capacity equation:

$$Q = Cv \cdot \pi \cdot (L^2 - R^2) \cdot h, \qquad (4)$$

Where *Cv* is the volumetric heat capacity of the rock, J/(m^3·K).

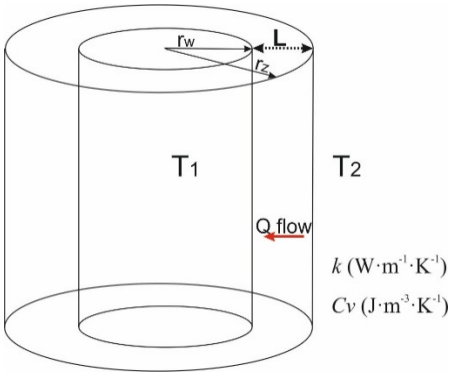


Fig. 4. Schematic representation of the zone of significant influence of the well on the temperature of rocks in the near-well space: T1, T2 – temperature in the well and outside the well influence; L – length in the radial direction of the influence zone of the well on the temperature of the reservoir

As a result of solving the system of equations (3) and (4) with respect to the unknowns *Q* and *L*, we obtain the equation for calculating the distance *L* and the amount of heat *Q*:

$$\boldsymbol{L} = \sqrt[3]{\frac{R\cdot k\cdot \Delta T\cdot t}{Cv} + \sqrt{\frac{R^2\cdot k^2\cdot \Delta T^2\cdot t^2}{Cv^2} - \frac{R^6}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{R\cdot k\cdot \Delta T\cdot t}{Cv} - \sqrt{\frac{R^2\cdot k^2\cdot \Delta T^2\cdot t^2}{Cv^2} - \frac{R^6}{27}}}, \quad (5)$$

$$\boldsymbol{Q} = Cv\cdot \pi\cdot (\boldsymbol{L}^2 - R^2)\cdot h. \quad (6)$$

And at the end of the calculations, we determine the value of the heat flux density *q* in the radial direction along the formation perpendicular to the well using the equation:

$$\boldsymbol{q} = \frac{\boldsymbol{Q}}{2\cdot \pi\cdot R\cdot h\cdot \Delta T\cdot t}. \quad (7)$$

After substituting the maximum recommended relaxation time *t* into equations (5) and (7), i.e., when the value of *ΔT* is maximum, we obtain the following distributions of the length of the temperature zone of influence of the well *L* and the radial heat flux density *q* (Fig. 5).

Discussion and conclusions

The results of numerical calculations of the temperature distribution in the well depending on the well downtime indicate that the maximum rate of temperature relaxation (approaching the natural background) occurs in the first 2 days after stopping the circulation of the flushing fluid (or conducting final logging). The size of the well diameter has a significant effect on the process of temperature recovery in the well: with an increase in diameter (cavity zones, large bit diameters at the initial stage of drilling), the process of temperature relaxation noticeably slows down in time. This indicates that in addition to the thermophysical parameters of the section layers, significant variability of the well diameter should be taken into account when calculating the current layer temperature in the well.

An express method for calculating the radial heat flux density and the size (depth) of the zone of significant influence of the well on the temperature distribution in the near-well space is proposed. The new approach involves representing the temperature distribution around the wellbore by analogy with the formation of the mud filtrate invasion zone. Through the calculations, it is possible to estimate the parameters of the well's influence on the temperature of the rocks in the radial direction at different times after the circulation of the flushing fluid stops.

Regarding the direction of further research, it would be advisable to investigate and choose a rational method for assessing the influence of the convection component of the temperature redistribution in the well at different time intervals after the well is stopped. It is also necessary to further study the issue of the influence of the well casing with steel pipes and cement behind the casing on the processes of temperature recovery in the well.

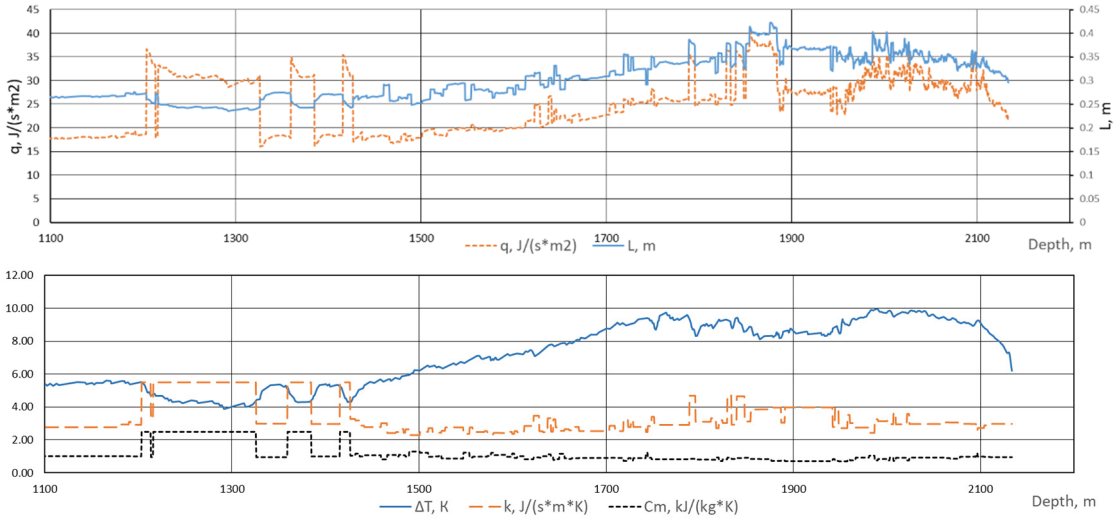


Fig. 5. Results of calculation of radial heat flux density q and the size of the well influence zone L on the temperature in the formation, initial data: initial temperature difference ΔT= ΔTo, thermal conductivity k, heat capacity of rocks Cm along the wellbore

Authors' contribution: Oleksii Karpenko – conceptualization, idea, analysis and interpretation of data, writing of the article; Ivan Virshylo – idea, analysis, writing of the article.

Sources of funding. The work was carried out within the framework of the grant "Geothermal Ukraine – an empowering change for Good: Making difference in technology for rapid development", provided by Innovate UK (part of UK Research and Innovation, is the UK's innovation agency).

References

Baisarovych, M., Mytropolskyi, O., & Chupryna, I. (2000). *Atlas of maps "Deep structure of the lithosphere and ecology of Ukraine"*. National Academy of Sciences of Ukraine [in Ukrainian]. [Байсарович М., Митропольський О., Чуприна І. (2000). Атлас карт "Глибинна будова літосфери і екологія України". К. НАН України].

Beier, R. (2020). Thermal response tests on deep borehole heat exchangers with geothermal gradient. *Applied Thermal Engineering*, 178, 115447. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115447

Beier, R. (2024). Effects by geothermal gradient on thermal response tests for boreholes. *Geothermics*, 121, 103029. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103029

Dang, Z., Chen, X., Yao, X., Xu, Z., Zhou, M., Yang, W., & Song, X. (2024). Wellbore temperature prediction model and influence law of ultra-deep wells in Shunbei Field, China. *Processes*, 12(8), 1715. https://doi.org/10.3390/pr12081715

Fuchs, S., Balling, N., & Forster, A. (2015). Calculation of thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity of sedimentary rocks using petrophysical well logs. *Geophysical Journal International*, 203, 1977–2000.

Gordienko, V., Gordienko, I., Zavgorodnyaya, O., & Usenko, O. (2002). *Thermal field of the territory of Ukraine*. Znannia [in Russian]. [Гордиенко В., Гордиенко И., Завгородняя О., Усенко О. (2002). Тепловое поле территории Украины. Знание].

Karpenko, O., Virshylo, I., & Chupryna, A. (2024). Non-standard approaches to the assessment of the lithological affiliation of rocks based on well logging data (Transcarpathian Basin). *In Proceedings of the 18th International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"* (pp. 1–5). https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510090

Kiradjiev, K., Halvorsen, S., Van Gorder, R., & Howison, S. (2019). Maxwell-type models for the effective thermal conductivity of a porous material with radiative transfer in the voids. *International Journal of Thermal Sciences*, 145, 106009. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106009

Kobranova, V. (1986). *Petrophysics*. Nedra [in Russian]. [Кобранова В. (1986). Петрофизика. Недра].

Rezvanov, R. (1982). *Radioactive and other non-electrical well logging methods*. Nedra [in Russian]. [Резванов Р. (1982). Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважины. Недра].

Waples, D., Pacheco, J., & Vera, A. (2004). A method for correcting log-derived temperatures in deep wells, calibrated in the Gulf of Mexico. *Petroleum Geoscience*. https://doi.org/10.1144/1354-079302-542

Отримано редакцією журналу / Received: 08.01.26
Прорецензовано / Revised: 09.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

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

Іван ВІРШИЛО, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-1285-5308
e-mail: virshylo@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Україна

РОЗПОДІЛ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В СВЕРДЛОВИНІ ТА ГІРСЬКИХ ПОРОДАХ ПІСЛЯ ЗАВЕРШЕННЯ КАРОТАЖУ

В с т у п . ***Розглянуто можливості використання даних геофізичних досліджень свердловин для оцінки зони впливу свердловини на температурне поле пластів в навколосвердловинному просторі. Для проведення досліджень використано результати інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловини Солотвинської западини Закарпатського прогину.***

М е т о д и . ***Розраховано значення теплофізичних характеристик – питомої теплопровідності і питомої теплоємності гірських порід різного складу і генезису з розрізу свердловини. Для розрахунку питомої теплопровідності було використано рівняння Максвелла. Значення питомої теплопровідності флюїдозаповнювача розраховувалось на основі адитивного впливу окремих компонентів: пластової води і газу. На основі використання класичних рівнянь – рівняння Фур'є, яке описує розповсюдження теплового потоку в радіальному напрямку від стовбура свердловини, і рівняння теплоємності розраховано значення радіальної щільності теплового потоку і величини (глибини) зони суттєвого впливу свердловини на розподіл температури в навколосвердловинному просторі.***

Р е з у л ь т а т и . ***Досліджено вплив часу простоювання свердловини після припинення циркуляції промивальної рідини на зміну температури в свердловині, щільності радіального теплового потоку і величини зони впливу свердловини. Із збільшенням часу, який пройшов після зупинення свердловини (часу простоювання, або часу релаксації), відносна похибка оцінювання істинної температури пластів відносно заміряної температури в свердловині різко зменшується. Новий підхід у розрахунках полягає в тому, що розподіл температури навколо свердловини представлено за аналогією з формуванням зони проникнення фільтрату бурового розчину. Найбільший градієнт зменшення похибки відбувається протягом перших двох діб після зупинення циркуляції промивальної рідини в свердловині. Встановлено, що окрім теплофізичних параметрів пластів розрізу слід враховувати значну мінливість діаметра свердловини при розрахунках поточної температури пласта в свердловині.***

В и с н о в к и . ***Запропоновано експресний спосіб розрахунку радіальної щільності теплового потоку і величини (глибини) зони суттєвого впливу свердловини на розподіл температури в навколосвердловинному просторі. Завдяки розрахункам можна оцінити параметри впливу свердловини на температуру гірських порід в радіальному напрямку в різний час після припинення циркуляції промивальної рідини.***

К л ю ч о в і с л о в а : свердловина, геотермічний градієнт, температура, рівняння Фур'є, теплопровідність, гірська порода, щільність теплового потоку

Олексій Карпенко є членом редколегії видання, тому не брав участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті.

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.

Oleksii Karpenko is the a member of the journal editorial board, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article.

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 550.831.23+550.83.001.5+550.83:528.94+550.83.053:681.3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.04

Петро ПІГУЛЕВСЬКИЙ, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ukr.net
Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

ПЕТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРІД ТОМАКІВСЬКОГО ГРАВІТАЦІЙНОГО МАКСИМУМУ

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

Вступ. *У статті викладено результати вивчення фондових та архівних матеріалів геологічних організацій щодо фізичних властивостей гірських порід у межах Томаківського гравітаційного максимуму (ТГМ), який розташований у центральній частині Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита. Результати попередніх геолого-геофізичних досліджень, отримані на початку 90-х років минулого століття, не дали відповіді на його природу. Тому завданням дослідження було проаналізувати матеріали петрофізичних властивостей докембрійських утворень по їх поверхні та вздовж стовбура Томаківської глибокої свердловини ТГ-1 до глибини 2000 м. Метою також було вивчення особливостей геологічної будови самого стовбура Томаківської глибокої свердловини.*

Методи. *В основі досліджень були фондові та архівні матеріали геологічних організацій "Південукргеологія" та "Дніпрогеофізика" щодо фізичних властивостей порід, з яких складається докембрійська поверхня та розріз Томаківського гравітаційного максимуму. Матеріали петрофізичних властивостей докембрійських утворень уздовж стовбура Томаківської глибокої свердловини ТГ-1 до глибини 2000 м було ретельно зібрано, проаналізовано та переосмислено з позицій сучасних гіпотез. На основі статистичної обробки магнітно-щільнісні властивості об'єднано в єдиний петрофізичний банк даних.*

Результати. *Вперше отримано узгоджену магнітно-щільнісну класифікацію порід Томаківського гравітаційного максимуму і бортів зеленокам'яних структур, яка охоплює понад 30 породних різновидів. Існуюча петрофізична латеральна неоднорідність структури та її зміни у верхній частині земної кори пояснюються збільшенням процентного складу в розрізі її найщільніших компонентів, а не впливом градієнта щільності з глибиною.*

Властивості магнетитовмісних різновидів біотитових мігматитів, аплітпегматоїдних гранітів та біотитових плагіомігматитів значно знижені порівняно з даними площинного відбору проб. Ця особливість зумовлена збідненням магнетиту в цих різновидах у межах локальних гравітаційних максимумів. Відзначено два інтервали потужністю перших сотень метрів зі збільшеними значеннями щільності та три інтервали з високими значеннями намагніченості. Від глибини 1700–1800 м і до забою цієї свердловини відзначається закономірне збільшення щільності та намагніченості кристалічних порід. У магнітному відношенні вздовж стовбуру свердловини виділяються три чітко окреслені інтервали високомагнітних порід потужністю до 100 м кожен на глибинах 100–200 м, 1200–1300 м та 1400–1500 м, що зумовлено переважанням магнітних різновидів біотитових гранітів, біотитових плагіомігматитів та амфіболітів.

Висновки. *Отримані результати, що узагальнюють значну кількість фізичних властивостей зразків, дають змогу провести детальніше картографування докембрійської поверхні за допомогою гравімагнітних полів під час виконання геологорозвідувальних робіт у пошуках корисних копалин. Результати вивчення фізичних властивостей геологічного розрізу до глибини 2000 м дозволяють по-новому розглянути особливості глибинної природи Томаківського гравітаційного максимуму при моделюванні його структури за допомогою гравітаційних та магнітних полів.*

Ключові слова: *Український щит, гравітаційне поле, Томаківський гравітаційний максимум, петрофізичні властивості, структурно-тектонічна будова.*

Вступ

Публікації авторів (Ентин и др., 2015; Свистун, Антонов, & Пігулевський, 2020; Svistun, & Pigulevskiy, 2021) про можливі варіанти використання гравітаційного поля України при вивчені геологічної будови земної кори та пошуків покладів корисних копалин підштовхнули автора до подальшого розвитку цієї теми. Територія України покрита різномасштабними гравітаційними зйомками, які показують особливості різнорівневої будови земної кори, відображеної у гравітаційному полі. Але інтерпретація аномаліївірних об'єктів потребує більш повної інформації про властивості гірських порід залежно від глибини їх залягання.

Одним з неординарних об'єктів у межах УЩ є Томаківський гравітаційний максимум (ТГМ), представлений регіональним підвищенням гравітаційного поля з амплітудою в епіцентрі 50–55 мГал (Ентин и др., 2015; Свистун, Антонов, & Пігулевський, 2020; Svistun, & Pigulevskiy, 2021) та розташований у межах центральної частини Середньопридніпровського мегаблоку (СПМ) Українського щита (УЩ) (Берзенин и др., 1988; Пигулевский, 2012; Тектонічна карта..., 2007). Просторово він тяжіє до крутого повороту на південь річки Дніпро між містами Дніпро і Запоріжжя. ТГМ часто ототожнюється із Запорізьким антиклінальним підняттям (Каляєв та ін., 1972) або з Томаківською антиформою II порядку (Берзенин и др., 1988; Переверзев и др., 1992). Його площа по ізолінії 40 мГал сягає 3550 км^2 при загальному периметрі ізолінії 283 км і витягнута в північно-північно-східному напрямку (рис. 1). Основний максимум розміщується на південний захід від м. Запоріжжя та північніше Каховського водосховища з епіцентром у північно-східній частині структури, де його інтенсивність сягає 53,5 мГал з площею по ізолінії 50 мГал близько 200 км^2.

За своєю інтенсивністю ТГМ зіставляється з аномаліями над Чортомлицькою, Конксською і Сурською зеленокам'яними структурами (ЗКС), однак характеризується значно нижчими градієнтами, що може свідчить про велику глибину залягання аномаліївірних мас. Просторово ТГМ доповнює центральну частину дугоподібних елементів, які складаються з ланцюжка субмеридіонально орієнтованих гравітаційних аномалій. Із заходу від ТГМ – це Верхівцевсько-Софіївсько-Чортомлицька смуга, а зі сходу – Дерезувацько-Конксько-Білозерська. Центральна смуга включає Сурську аномалію і ТГМ (рис. 1, 2).

© Пігулевський Петро, 2026

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

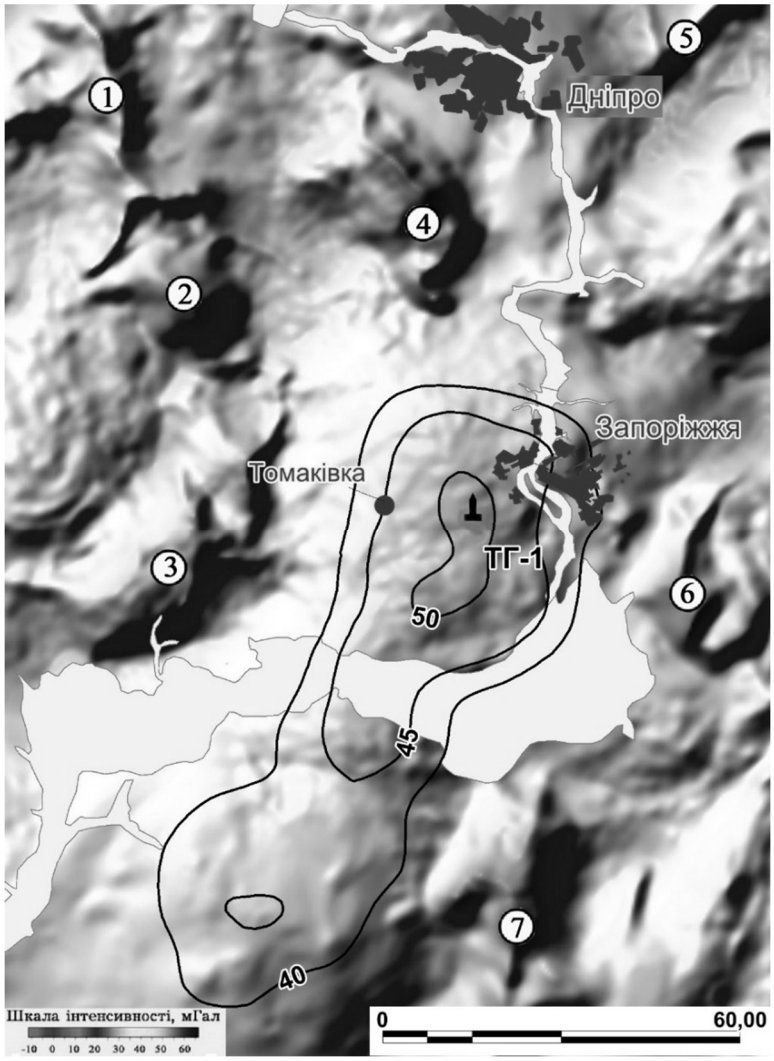


Рис. 1. 3D-зображення аномального гравітаційного поля Δg а (в редукції Буге=2,3 г/см^3) центральної частини Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита. Тектонічні елементи. Томаківська антиформа II порядку (Томаківський гравітаційний максимум). Зеленокам'яні структури: 1 – Верхівцевська, 2 – Софіївська, 3 – Чортомлицька, 4 – Сурська, 5 – Дерезувацька, 6 – Конкська, 7 – Білозерська. ТГ-1 – Томаківська глибока свердловина

Для вивчення можливого зв'язку регіонального ТГМ з латеральними змінами щільності на рівні ерозійного зрізу порід кристалічного фундаменту, попередники (Переверзев и др., 1992) визначили середні значення щільності в межах елементарного осередку ~40 км^2 у смузі завширшки 10 км із центром у місці закладення свердловини. Значення щільності розраховувались з використанням свердловин, які потрапили в межі елементарного осередку, і загалом по осередку. В результаті обробки побудованих гістограм розподілу середньої щільності і їх зіставлення з графіком зміни Δg а було отримано інформацію, яка показала відсутність латеральних змін (зростання) щільності вивченої бурінням частини розрізу від флангів ТГМ до його центру.

Для оцінки альтернативних варіантів пояснення природи ТГМ попередники вивчили можливий його зв'язок з такими факторами:

- ефектом підйому поверхні кристалічного фундаменту на вододілі річок Томаківка і Дніпро;
- не розкритою сучасним ерозійним зрізом зеленокам'яною структурою;
- інтегрованим впливом щільнісних неоднорідностей, розкритих у верхній частині розрізу свердловиною ТГ-1;
- загальним підняттям з подальшою ерозією всього блоку порід, включаючи ТГМ, за наявності вертикального градієнта щільності порядку 0,01 г/см^3/км відповідно до уявлень Голіздри (1988), Тяпкіна (1998).

За результатами досліджень в 70–90 рр. минулого століття було запропоновано кілька гіпотез інтерпретації природи аномалії. Каляєв та ін. (1972) трактували аномалію як антиклінальне підняття з поетапним збільшенням частки основних порід, метаморфізованих гранулітовою фацією, із глибиною. З. О. Крутіховська (1971), внаслідок розміщення Томаківської аномалії на одній вісі із Сурською ЗКС і утворення поясу, паралельного Конксько-Білозерському і Верхівцевсько-Чортомлицькому, зробила припущення, що аномалія спричинена основними породами конксько-верхівцевської серії, не розкритих ерозією. На початку 90-х рр. минулого століття в результаті обробки геологічних і геофізичних даних (включаючи і глибинне сейсмозондування), завірки аномалії бурінням глибокої свердловини ТГ-1 (Литосфера..., 1988; Переверзев и др., 1992), було зроблено припущення, що аномалія викликана антиклінальним, а вірніше, валоподібним підняттям кристалічних порід із збільшенням частки

амфіболових мігматитів, основних порід славгородської товщі аульської серії із глибиною. Водночас відзначалось також збільшення ступеня метаморфізму в цьому напрямку. Особливість тектоніки структури Томаківської аномалії, на відміну від вищеназваних, полягає в тому, що на поверхні будова антикліналі проявляється слабко, але її масштаб і контрастність із глибиною збільшуються. Тектонічний процес, який привів до утворення антикліналі, характеризується вертикальним рухом знизу вверх з поступовим затуханням результатів цього руху до поверхні. При цьому простежується складна будова антиклінального підняття – крім центрального підняття, спостерігаються антиклінальні підняття другого порядку, концентрично облямовуючи центральну частину. Згідно з геофізичними даними, західне крило має кути падіння 30–35°, а східне – 10–20°. Результати буріння глибокої свердловини визначили кути падіння від 15–20° до 35–40° на забої. Спостережені відхилення нахилу смугастості від указаних границь пов'язані з утворенням складок плину в розігрітому матеріалі кори, коли він був у стані підвищеної пластичності (Переверзев и др., 1992).

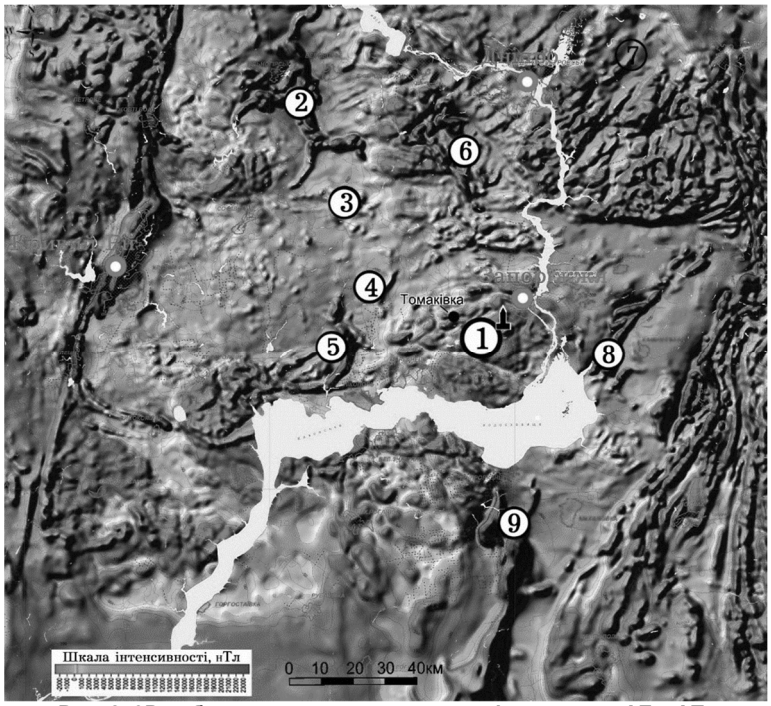


Рис. 2. 3D-зображення аномального магнітного поля ΔZa, ΔTa Середньопридніпровського мегаблоку Українського щита. Тектонічні елементи. Томаківська антиформа II порядку (Томаківський гравітаційний максимум) – 1. *Зеленокам'яні структури*: *2 – Верхівцевська, 3 – Софіївська, 4 – Кринічувацька, 5 – Чортомлицька, 6 – Сурська, 7 – Дерезувацька, 8 – Конкська, 9 – Білозерська*

Також свої варіанти будови земної кори Середньопридніпровського мегаблоку (Придніпровського палеосклепіння) Українського щита були запропоновані Ю. П. Оровецьким (Оровецкий и др., 1997), А. Г. Насадом та іншими, які пов'язували регіональну аномалію з підйомом поверхні Мохоровичича (Насад и др., 1997; Насад, Коваленко, & Пигулевский, 2000). В. І. Старостенко, П. Я. Купрієнко, І. Б. Макаренко досліджували окремі особливості складу земної кори та будови поверхні Мохоровичича СПМ за результатами тривимірного моделювання гравітаційного поля території України (Куприенко и др., 2007а; 2007б; Старостенко и др., 2007). П. Г. Пігулевський у своїх дослідженнях запропонував модель будови літосфери за геоелектричними даними до глибини 200 км (Пигулевский, 2012).

Для вивчення природи ТГМ на межі 80 та 90-х рр. минулого століття було пробурено глибоку свердловину ТГ-1, яка не змогла дати однозначну відповідь про його геологічну природу (Переверзев и др., 1992). Виконані при цьому комплексні геолого-геофізичні дослідження в свердловині також не змогли пояснити феномен ТГМ за рахунок щільнісної диференціації порід верхньої 2-кілометрової частини докембрійських утворень.

За геохронологічними даними вік геологічної структури встановлюється як мезоархейський (Артеменко, 1995; Орса, 1989; Щербаков и др., 1984; Єсипчук та ін., 2002). На користь цього свідчить розташування аномалії, яка є продовженням Сурської аномалії і складає пояс, паралельний сусіднім поясам, утвореним зеленокам'яними структурами: із заходу Верхівцевсько-Чортомлицькому, а зі сходу – Конксько-Білозерському. ЗКС складені породами конкської та білозерської серій мезоархейського віку, тому час формування поясів встановлюється також як мезоархейський. Підтвердженням цього служить належність гранітів мокромосковського та токівського комплексів до Томаківської аномалії, які, як відомо, також мають мезоархейський вік.

Диз'юнктивна тектоніка в районі Томаківського максимуму набула широкого розвитку. На відміну від плікативних структур, встановити вік того чи іншого розлому, особливо в умовах закритого району, надзвичайно складно, а частіше за все, неможливо. Разом з тим, використовуючи системний аналіз, можна зробити припущення про те, що система субширотних і ортогональних до неї меридіональних порушень передбачувано палеоархейського віку, а діагональні розломи належать до мезоархейських (Tiapkin, Pihulevskyi, & Dovbnich, 2017). Однак

треба брати до уваги довготривалий характер головних розломів і частково більш дрібних порядків. Палеоархейські розломи зазнавали оновлення протягом тривалого часу. Передусім це стосується Південночортомлицького та Новопавлівського розломів.

За ступенем значущості і масштабом розривні порушення можна розділити на розломи головні: Девладівський, Хортицький, Новопавлівський, Південночортомлицький, Конкський і другорядні, з яких найбільші: Дмитрівський, Михайлівський, Жмеринський, Борисівський, Кисличеватський і Тарасівський (Коваленко и др., 1986; Переверзев и др., 1992).

У магнітному полі Томаківської площи виділяються протилежні за будовою дві області – в цілому підвищене до величин 100–150 нТл мозаїчне поле, яке збігається із загальним контуром ТГМ (рис. 2) та відповідає магнітним варіаціям порід, представлених переважно гранітами біотитовими і плагіогранітами. Зниженим мозаїчним полям, що їх оконтурюють, інтенсивністю від -50 до -100 нТл, відповідають немагнітні породи переважно гранітного складу. У межах останніх виділяється еліпсоподібна аномалія найбільш зниженого спокійного магнітного поля, з якою збігається субширотний локальний гравітаційний мінімум. На підставі даних буріння (Переверзев и др., 1992) ця комплексна аномалія інтерпретується як ядро Новодніпровської антикліналі. Масив поділяє дугоподібні елементи фізичних полів та відділяє ТГМ від Сурської структури на півночі. У магнітному полі це зазвичай вузькі протяжні максимуми інтенсивністю у перші сотні нТл, які відповідають переважно тілам гнейсів, мігматитів, сланців і, у невеликому обсязі, магнітним різновидам амфіболітів. Одним з найбільш яскравих елементів магнітного поля є розташована в центральній частині ТГМ вузька протяжна зона мінімумів Za північно-західного простягання (рис. 2), що інтерпретується як прояв Новопавлівського розлому, виконаного немагнітними різновидами плагіогранітів і гранітів апліто-пегматоїдних. На південь від цього розлому серією дайкоподібних тіл широтного простягання, переважно амфіболітового та гнейсового складу, простежується Південночортомлицький розлом.

На північному сході ТГМ підвищене магнітне поле відповідає масивам магнітних різновидів біотипових гранітів і плагіогранітів, розвинених у його центральних частинах, які обмежуються чітко проявленим у магнітному полі і незначним у гравітаційному Хортицьким розломом північно-західного простягання. Далі на північний захід максимуму зона розлому контролюється зривом закінчень локальних магнітних максимумів, що відповідають переважно вузьким тілам гнейсів і мігматитів (іноді амфіболового складу). Максимуми магнітних аномалій у північній частині відповідають зоні Девладівського розлому. Аномалії є субширотними, досить протяжними і вузькими, різного знаку. Спостерігається зона Девладівського розлому, яка простежується до Криворізько-Кременчуцької шовної зони (Pihulevskyi et al., 2023). Його центральну частину займає ізометричне підвищення магнітного поля інтенсивністю 400 нТл і вище, що відповідає масиву магнітних різновидів гранітів і мігматитів біотитових. Серед цих порід встановлено прошарки амфіболітів, які пояснюють зафіксований локальний протяжний максимум гравітаційного поля північно-східного простягання, що просторово збігається з позитивною магнітною аномалією (рис. 1, 2). У північній частині максимуму фіксується ізометричне підвищення гравітаційного поля, яке, ймовірно, відповідає масиву відносно щільних біотітових плагіомігматитів та біотитових гнейсів.

У східній частині ТГМ серед масиву біотитових плагіомігматитів з останцями гнейсів амфібол-біотитових виділяються дві невеликі ізометричні позитивні аномалії магнітного поля. В межах однієї з них свердловиною розкрито діорити, що дає підстави інтерпретувати ці аномалії як виходи невеликих тіл діоритів. У районі с. Томаківки за матеріалами зйомки масштабу 1:50000 виділяється характерна аномалія магнітного поля еліпсоподібної форми субширотного простягання. Судячи з кільцеподібного поля розглянутої площі, аномалієтвірний об'єкт являє собою синклінальну структуру, крила якої складені специфічним комплексом порід (перешаровуванням залізистих кварцитів, кристалосланців амфібол-магнетит-кварцових, амфіболітів). Для західного крила структури характерні пластоподібні консонантні тіла ультраосновних порід (перидотитів та актинолітитів за ними).

У цілому слід відзначити значно менший розвиток ультраосновних порід порівняно з очікуваним.

Виконана авторами (Переверзев и др., 1992) кількісна перевірка різних гіпотез будови максимуму засвідчила, що ні одна із цих версій не пояснює спостережене поле.

Методи

Основою досліджень були фондові та архівні матеріали геологічних організацій "Південукргеологія" та "Дніпрогеофізика" про фізичні властивості порід, що складають докембрійську поверхню та розріз Томаківського гравітаційного максимуму. Незважаючи на те, що каталоги у виробничих звітах містять різнорідну інформацію, яка стосується макроскопічного опису зразків порід, все ж таки вони дали змогу зберегти значну кількість первинних даних і полегшили роботу з пошуку, збирання та узагальнення матеріалів визначень фізичних властивостей гірських порід.

Матеріали петрофізичних властивостей докембрійських утворень уздовж стовбура Томаківської глибокої свердловини ТГ-1 до глибини 2000 м було ретельно зібрано та систематизовано з метою отримання додаткової інформації про особливості будови тектонічної одиниці. Для підвищення геологічної ефективності накопиченої інформації з переобробки та додаткового аналізу результатів вимірювань фізичних властивостей було застосовано єдину для центральної частини Середньопридніпровського регіону методику обробки (Толстой та ін., 2003). Вона враховувала і методичні підходи, застосовані авторами в роботі (Пигулевский, & Свистун, 2014; Pihulevskyi et al., 2024; Pihulevskyi et al., 2025).

При обробці ставилися завдання: відобразити найбільш суттєві закономірності зміни фізичної характеристики порід різного генезису та складу; використовувати петрофізичну характеристику для з'ясування загальних або відмінних умов утворення, літогенезу, метаморфізму різних геологічних формацій для внесення коректив до існуючої схеми формаційного розчленування порід докембрію.

Аналіз наявних геологічних матеріалів для території ТГМ показав, що густота розташування пробурених свердловин та відслонень на площі практично скрізь відповідає масштабу геологічної зйомки 1:50000 (Організація та проведення..., 1999). Для отримання наявної картини петрофізичної диференціації геологічних утворень обробка виконувалась в два етапи. На першому етапі було виконано петрофізичну класифікацію порід, що передбачає виділення петрощільнісних та петромагнітних груп порід з урахуванням закономірних зв'язків між фізичними властивостями, складом та текстурою порід, які відображають умови їх утворення, літогенезу та метаморфізму (Есипчук и др., 1993; Орса, 1989). На другому вивчалися можливості відображення петрофізичної латеральної

ISSN 1728-3817

неоднорідності геологічних утворень (Толстой та ін., 2003) для розуміння глибинної будови ТГМ (Pigulevskiy, & Stovas, 2022; Pigulevskiy, & Shumlianska, 2024; Shumlianska, & Pigulevskiy, 2024; Shumlianska et al, 2024).

Результати

Отримані середні значення щільності та намагніченості порід для різних комплексів дали змогу надалі виконати оцінку розвитку стратифікованих і нестратифікованих утворень (Єсипчук та ін., 2004), а також підготувати основу для розуміння глибинної геологічної будови ТГМ.

З іншого боку, фактично існуючі межі коливань окремих різновидів порід призводять до суттєвого їх накладання і, таким чином, зростання неоднозначності інтерпретації. Взагалі, характер прояву у фізичних полях залежить від потужності та будови окремих тіл і масивів, складу навколишніх порід та варіацій речовинного складу, які приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні властивості докембрійських порід центральної частини Середньопридніпровського мегаблоку (ТГМ з урахуванням бортів зеленокам'яних структур)

№ групи	Назва породи	Кількість визначень	Фізичні властивості	
			Щільність, σ х г/см^3	Магнітна сприйнятливість, æ х 4π х 10^{-6} СІ
1	Плагіограніти біотитові	192	2,70 2,62-2,80	16 0 - 522
2	Плагіограніт – порфіри (сурські)	26	2,71	18
3	Плагіомігматити біотитові	477	2,73	181
4	Плагіомігматити амфібол-біотитові	71	2,74 2,66-2,79	774 14-8486
5	Тоналіти біотитові	44	2,77	170
6	Граніти аплітo-пегматоїдні	121	2,61 2,49-2,71	70 0-430
7	Граніти біотитові порфіроподібні (демуринські)	40	2,68 2,59-2,80	297 0-1616
8	Граніти біотитові (токівські)	309	2,68	85
9	Граніти біотитові (мокромосковські)	387	2,65	128
10	Мігматити двопольовошпатові	96	2,69	123
11	Метадіорити, метагабродіорити	42	2,82 2,61-2,95	75 7-2080
12	Діорити, діорити кварцові	36	2,82	75
13	Кварцові порфіри, альбітофіри, плагіопорфіри	21	2,72	60
14	Метаріоліти	54	2,67 2,61-2,94	100 60-1830
15	Метадацити	29	2,77 2,55-2,80	22 2-242
16	Метадолерити (криничуватські)	54	2,96 2,75-3,07	120 0-170
17	Діабази	26	2,92 2,78-3,04	829 62-6100
18	Метагабро, метагабродіабази	35	2,88 2,90-3,12	1032 1 -8065
19	Туфолави та туфи основного складу	33	2.85 2,80-2,95	530 10-1330
20	Метаандезити	37	2,81	60
21	Тремолітити, плагіоклаз – тремолітові сланці	32	2,96	240
22	Серпентиніти, сильно серпентинізовані ультраосновні породи	92	2,64 2,63-2,71	3950 180-6900
23	Актинолітити, плагіоклаз-актинолітові сланці	66	2,99 2,95-2.96	100 120-5300
24	Тальк-хлорит-карбонатні, тальк-карбонатні породи	53	2,87 2,89-2,92	415 395-5130
25	Амфіболіти конкської серії в рамі ЗКС	131	3,00 2,98-3,01	115 100-650
26	Амфіболіти аульської серії	189	2,97	100
27	Гнейси біотитові аульської серії	144	2,69	54
28	Гнейси амфібол-біотитові аульської серії	57	2,80	921
29	Сланці біотит-актиноліт-плагіоклазові	159	2,97	125
30	Гнейси гранат-біотитові	25	2,86	1020
31	Гнейси силіманіт-гранатові	19	2,77	680
32	Сланці амфіболові	47	2,97	85
33	Плагіоклаз-кварц-серицитові сланці	73	2,74	60
34	Залізисті кварцити	71	3,25	63500
35	Кристалосланці кварц-магнетит-амфіболово-гранатовий, магнетитові	150	3,12 2,63-3,87	19797 20-101000
36	Кристалосланці плагіоклаз-амфіболові	14	3,03 2,90-3,17	74 0-149
37	Метапісковики	572	2,74	50

Загалом, з урахуванням приведених даних, було виділено такі групи порід:

Перша група – нещільні (2,6 ÷ 2,7 – тут та надалі значення щільності наведено в г/см^3), слабомагнітні (10 ÷ 100 – тут та надалі значення магнітної сприйнятливості наведено в од. х 4π х 10^{-6} СІ): плагіограніти біотитові (1 – тут та надалі номер відповідає табл. 1), граніти апліто-пегматоїдні (6), метаріоліти (14), метадацити (15).

Друга група – нещільні (2,.6 ÷ 2,7), магнітні (100–1 000): плагіомігматити біотитові (7), граніти біотитові токівські (8), граніти біотитові мокромосковські (9), мігматити двопольовошпатові (1).

Третя група – нещільні (2,6 ÷ 2,7), високомагнітні (100–10 000): граніти біотитові порфіроподібні (демуринські) (7), серпентиніти (22).

Четверта група – середньої щільності (2,7 ÷ 2,8), слабомагнітні (10–100): плагіограніти-порфіри сурські (2), метадіорити (11), метагабродіорити (14), плагіоклаз-кварц-серицитові сланці (33), метапісковики (37).

П'ята група – середньої щільності (2,7 ÷ 2,8), магнітні (100–1 000): тоналіти біотитові (15), плагіомігматити амфібол-біотитові (4), гнейси амфібол-біотитові аульської серії (28).

Шоста група – щільні (2,8 ÷ 3,0), слабомагнітні (10-100): діорити, діорити кварцові (12), туфолави та туфи основного та середнього складів (19), метаандезити (29), актинолітити, тремолітити (21,23), амфіболіти (25, 26), гнейси біотитові аульської серії (27), сланці біотит-актиноліт-плагіоклазові (28), кварцові порфіри, альбітофіри, плагіопорфіри (13).

Сьома група – щільні (2,8 ÷ 3,0), магнітні (100–1 000): метадолерити криничуватські (16), діабази (17), тальк-хлорит-карбонатні, тальк-карбонатні породи (24), гнейси гранат-біотитові (30), силіманіт-гранатові (31).

Восьма група – найбільш високими значеннями фізичних параметрів характеризуються кристалосланці кварц-магнітит-амфіболово-гранатовий, магнетитові – 3,12, 49 797 (35) і залізисті кварцити – 3,25, 63 500 (34).

Дев'ята група – високощільні (3,0 ÷ 3,1), слабомагнітні (10–100): кристалосланці плагіоклаз-амфіболові, слабомагнітних (3,17; 85) – кристалосланці амфіболові (36).

До високощільних (3.01) і магнітних (532) віднесено метагабро, метагабродіабази (18).

Окремо слід підкреслити існуючу різницю між демуринськими, токівськими і мокромосковськими біотитовими гранітами, з яких найменш щільними і магнітними є мокромосковські (2,65, 128), а найбільш щільні і магнітні – токівські (2,67, 958).

Всі щільності порід, які знайшли відображення в табл. 1, практично лежать в інтервалі 2,61–3,33 г/см^3. При цьому частину зразків відібрано з відслонень, зон розломів, а деякі різновиди порід (сланці кварц-кумінгтонітові, гнейси біотитові, метасоматити кварц-карбонат-плагіоклаз-хлорит-амфіболові, катаклазити по гранітах і деякі інші) мають недостатню кількість визначень – від 3 до 15. З іншого боку, для всієї сукупності порід характерний практично безперервний спектр щільності у зазначеному вище інтервалі. Частина порід має емпіричні ряди розподілення щільності і магнітних властивостей, значно відмінних, відповідно, від нормального і логнормального законів. У табл. 1 їм відповідають породи із сильно відмінними від нуля коефіцієнтами асиметрії та ексцесу: гранітоїди, пегматити, апліто-пегматити, апліти, амфіболіти, сланці хлорит-актиноліт-тремолітові, кварц-карбонат-плагіоклаз-хлорит-біотитові породи та ін. Тому інтервали зміни фізичних властивостей окремих різновидів порід часто перекривають один одного.

Все відзначене вище вказує на те, що класифікація порід по середніх (або модальних) значеннях щільності і магнітної сприйнятливості і виділення їх у групи має відносно умовний характер.

Для оцінки очікуваних значень нормального розподілу щільності було виконано *t*-тест Стьюдента статистичної значущості різниці математичних очікувань двох вибірок та довірчого інтервалу різниці очікуваних значень. Виконано оцінку статистичної значущості відмінностей щільнісних властивостей структурно-речовинних комплексів для локальних максимумів та мінімумів гравітаційного поля, її результати наведено в табл. 2.

Аналіз побудованих гістограм розподілу щільності в локальних гравітаційних максимумах (3,1) та мінімумах (3,2) гравітаційного поля показав, що в перших переважають породи зі щільністю 2,7 – 2,8 г/см^3, а в других 2,6 – 2,7 г/см^3 (рис. 3). Такий розподіл значень в геологічному просторі і зумовлюють локальні коливання гравітаційного поля.

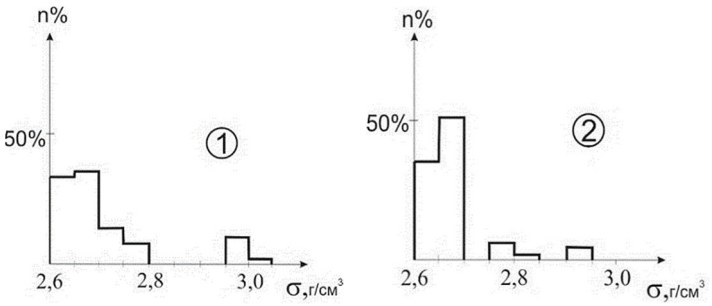


Рис. 3. Гістограми розподілу щільності в локальних гравітаційних максимумах (1) та мінімумах (2) гравітаційного поля

Щільнісні і магнітні властивості порід за розрізом ТГ-1. Аналіз даних з визначення фізичних властивостей по свердловині Томаківська глибока – 1 (табл. 3.1 та 3.2) показав:

- Групи і комплекси порід, розкриті свердловиною, загалом подібні вивченим по площі, а їх фізичні властивості дуже близькі. В основному щільнісні характеристики більшості груп рівні або на 0,01–0,02 вищі у зразків, розкритих свердловиною, порівняно з "площинним опробуванням", що є закономірним і пов'язано, ймовірно, із загальним ущільненням порід із глибиною.

Виняток становлять аномально низькі щільності, одержані по свердловині для гнейсів біотитових і високі – для піроксеніту. Найбільш вірогідним поясненням є мала представленість вибірки для цих типів (відповідно 2 і

18 зразків, табл. 4), разом з великими варіаціями щільнісних параметрів. Суперечливі і понижені значення щільності розкритих свердловиною плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових. Скоріш за все, це пов'язано з різко підвищеною щільністю магнітних різновидів, що викликано, як це видно по збільшенню магнітної сприйнятливості, з підвищеним вмістом магнетиту в зразках, розкритих на площі.

Таблиця 2

Оцінка статистичної значущості відмінностей щільнісних властивостей структурно-речовинних комплексів для локальних максимумів та мінімумів гравітаційного поля

Назва породи	Параметри вибірок						Критерій Стьюдента (таблична величина при 5 % рівні значущості 1,98)
	max			min			
	σ г/см³	n	σ г/см³	σ г/см³	n	σ г/см³	
Гнейс біотитовий	2,69	44	0,05	2,68	97	0,06	1,82
Гнейс біотит-амфіболовий, амфіболовий	2,79	11	0,10	2,79	25	0,10	0
Амфіболіт	2,98	35	0,10	2,94	32	0,14	1,33
Мігматит біотитовий	2,68	19	0,12	2,67	47	0,06	0,69
Плагіомігматит біотитовий	2,73	61	0,04	2,69	92	0,06	1,37
Плагіомігматит амфіболовий, амфібол-біотитовий	2,77	18	0,06	2,78	14	0,09	0,35
Граніт біотітовий немагнітний	2,65	71	0,06	2,64	150	0,05	0
Граніт біотітовий магнітний	2,68	16	0,02	2,69	66	0,02	1,75
Граніт апліто-пегматоїдний	2,63	42	0,02	2,60	66	0,04	1,72
Плагіограніт біотитовий	2,68	60	0,05	2,66	117	0,04	0
Плагіограніт біотитовий (магнетитовмісний)	2,71	11	0,03	2,69	30	0,02	1,02
Гнейс біотитовий (магнетито-вмісний)	2,80	9	0,02	2,72	19	0,06	0,17
Вибірка загалом Σ	2,70	397	0,06	2,68	829	0,05	5,75

• Пониженими порівняно з даними "площинного опробування" є магнітні властивості магнітних різновидів мігматитів біотитових – $æ_{сер.}$, відповідно, сягає 1258 і 389, гранітів апліто-пегматоїдних – відповідно 2619 і 314 і плагіогранітів біотитових магнетитовмісних – 1190 і 370.

• Більшість зразків свердловини ТГ-І характеризуються незначними варіаціями $σ_{сер.}$ в межах 2,65–2,70 (табл. 3.1 та 3.2). При цьому різко підвищеними значеннями щільності відзначаються амфіболіти, плагіомігматити амфіболові, амфібол-біотитові, кристалосланці амфібол-біотитові, які утворюють малопотужні (перші метри) тіла із значеннями $σ_{сер.}$ до 3,0 г/см³ і більше). В найнижчій частині свердловини розріз представлений переважно плагіомігматитами біотитовими із середньою щільністю до 2,75, проте зразок із забою (2000 м) має σ = 2,88.

Крім того, в інтервалах 200–500 і 1200–1600 м спостерігається незначні підвищення інтервальної щільності до 2,78–2,82 г/см³.

В магнітному відношенні по свердловині виділяються три чітко виражені інтервали високомагнітних порід потужністю до 100 м кожний, на глибинах 100–200 м, 1200–1300 м і 1400–1500 м, викликаних, відповідно, переважанням магнітних різновидів гранітів біотитових, плагіомігматитів біотитових і амфіболітів ($æ_{інт.}$ до 3000). З глибин 1700–1800 м і до забою спостерігається закономірне зростання $æ_{інт.}$ до величин æ = 1600, викликане переважанням магнітних різновидів плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових і гнейсів біотит-амфіболових, амфіболових.

Враховуючи інтегральний характер впливу гравімагнітоактивних тіл на спостережені поля, у вивченій свердловиною ТГ-1 частині розрізу було виконано аналіз середніх значень інтервальної щільності (потужність інтервалу 100 м) від гирла свердловини до її забою. Для встановлення природи виявлених щільнісних неоднорідностей (ущільнення) в межах кожного інтервалу було визначено середні значення щільності для кожного типу окремо і загалом для інтервалу, а також побудовано гістограми розподілу інтервальної щільності (рис. 4). Отримані дані свідчать про відсутність вираженого градієнта щільності з глибиною, а виявлені щільнісні аномалії пов'язані із збільшенням відсоткового складу найбільш щільних компонентів – переважно амфіболітів у верхній частині розрізу і кристалосланців піроксен-біотитових, гнейсів біотит-амфіболових і амфіболових, плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових – в нижній.

Таблиця 3.1

Таблиця розподілу фізичних властивостей гірських порід фундаменту ТГМ вздовж стовбура свердловини ТГ-1 від 0 до 1000 м

Інтервал	0-100		101-200		201-300		301-400		401-500		501-600		601-700		701-800		801-900		901-1000	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
2,55-2,60	1	9,10	1	1,78									2	3,64						
2,60-2,65	7	63,6	18	32,15	14	25,45	15	24,99	5	11,65	17	35,36	28	50,9	15	27,3	14	30,43	21	44,7
2,65-2,70	3	27,3	21	37,51	20	36,36	20	33,32	18	41,94	19	39 52	21	38,18	27	49,1	22	47,84	19	40,4
2,70-2,75			2	3,57	5	9,09	4	6,66	4	9,3	6	12,5	1	1,82	5	9,09	9	19,56	2	4,26
2,75-2,80					2	3,64	1	1,67	2	4,65	2	4,16					1	2,174	1	2,12
2,80-2,85			1	1,79	1	1 82	2	3,33	3	6,99					1	1,82			1	2,12
2,85-2,90			1	1,79	1	1,82			2	4,65										
2,90-2,95			1	1,78	1	1,82	4	6,66	4	9,3					4	7,27			1	2,13
2,95-3,0			2	3,57	5	9,09	3	5,00	4	9,3	2	4,16	1	1,818	2	3,64			1	2,13
3,0-3,05			6	10,72	3	5,45	6	10,00	1	2,33	1	2,08	2	3,64	1	1,82			1	2,13
3,05-3,10			3	5,36	3	5,45	3	1,99												
3,10-3,15							2	3,33			1	2,08								
3,15-3,20																				
3,20-3,25																				
3,25-3,30																				
Σn	11	100	56	100	55	100	60	1400	43	100	48	100	55	100	55	100	46	100	47	100

Таблиця 3.2

Таблиця розподілу фізичних властивостей гірських порід фундаменту ТГМ вздовж стовбура свердловини ТГ-1 від 1001 до 2000 м

Інтервал	1001-1100		1101-1200		1201-1300		1301-1400		1401-1500		1501-1600		1601-1700		1701-1800		1801-1900		1901-2000	
	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%	n	%
2,55-2,60	1	1,96	1	2,5					1	1,75			1	2,08						
2,60-2,65	24	47,1	11	27,5	11	22,88	5	11,11	14	24,56	9	14,06	2	4,16	6	11,3	7	14,28	8	17,0
2,65-2,70	18	35,3	21	60	25	52	20	44,44	25	43,85	14	21,88	20	41,66	25	47,2	26	53,07	24	51,1
2,70-2,75	2	3,92	3	7,5	6	12,5	9	20	6	10,53	7	10,94	14	29,12	10	18,9	6	16,33	6	12,8
2,75-2,80	1	1,96	1	2,5	1	2,08	4	8,89	2	3,51	4	6,25	8	16,64	5	9,43	1	2,04	3	6,38
2,80-2,85	1	1,96			1	2,08			1	1,75	4	6,25	1	2,08	3	5,66			2	4,25
2,85-2,90	1	1,96					3	6,66	2	3,508	2	3,13	1	2,08	5	5,66			3	6,38
2,90-2,95	1	1,96			1	2,08					2	3,13	1	2,08	1	1,89	1	2,04	1	2,18
2,95-3,0	2	3,92			1	2,08	1	2,22			5	7,81					2	4,08		
3,0-3,05							t	2,22	4	7,02	9	14,06					2	4,08		
3,05-3,10							2	4,44	2	3508	5	7,81					2	4,08		
3,10-3,15											2	3,125								
3,15-3,20											1	1,56								
3,20-3,25					1	2,08														
3,25-3,30					1	2,08														
Σn	51	100	40	100	48	100	45	100	57	100	64	100	48	100	53	100	49	100	47	100

Таблиця 4

Результати розрахунків фізичних властивостей гірських порід, розкритих свердловиною ТГ-1

Назва порід	Щільність в г/см^3									Магнітна сприйнятливість æ x 10^{-6} од,СІ								
	Середня			Немагнітні			Магнітні			Середня			Немагнітні			Магнітні		
	n	σ	ε	n	σ	ε	n	σ	ε	n	æ	ε	n	æ	ε	n	æ	ε
Кристалосланець кварц-магнетит-амфіболово-гранатовий	2	3,23	0,03							2	43500	10500						
Гнейс біотитовий	2	2,64	0,01							2	126	4						
Гнейс біотит-амфіболовий, амфіболовий	22	2,81	0,06	5	2,81	0,03	17	2,81	0,08	22	1937	2130	5	68	21,1	17	2486	2131
Амфіболіт	122	2,98	0,09	55	2,97	0,08	67	2,99	0,1	122	1637	4024	55	62	12	67	2930	5077
Піроксеніт	18	2,96	0,11	11	2,95	0,1	7	2,96	0,13	18	5838	10359	11	59,9	16	7	18550	10410
Мігматит біотитовий	30	2,67	0,03	10	2,68	0,03	20	2,67	0,07	30	275	289	10	46	26	20	389	293
Плагіомігматит біотитовий	323	2,69	0,04	111	2,68	0,04	212	2,69	0,04	323	570	990	111	44	21	212	845	1128
Плагіомігматит амфіболовий, амфібол-біотитовий	39	2,75	0,07	9	2,76	0,06	30	2,75	0,07	39	841	1166	9	50	21	30	1078	1222
Граніт біотитовий немагнітний	161	2,66	0,03							161	46	24						
Граніт біотитовий магнітний	226	2,67	0,03							226	796	937						
Граніт аплітo-пегматоїдний	12	2,62	0,02	8	2,61	0,02	4	2,63	0,12	12	155	165	8	76	25	4	314	205
Плагіограніт біотитовий	15	2,68	0,03	12	2,67	0,03	3	2 68	0,05	15	41	67	12	13	21	3	157	66
Плагіограніт біотитовий (магнети-товмісний)	1	2,65	0							1	370	0						
Сланець хлорит-біотитовий	1	2,84	0							1	47	0						
Катаклазит	3	2,63	0,01							3	15	29						

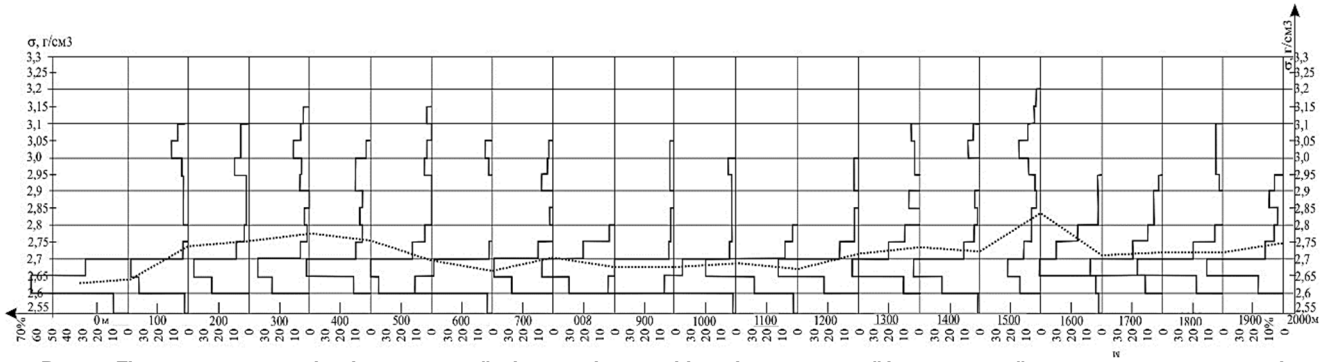


Рис. 4. Гістограми розподілу інтервальної щільності та графік зміни середньої інтервальної густини по свердловині

ISSN 1728-3817

Дискусія і висновки

Побудовані гістограми розподілу інтервальної щільності та графік зміни її середніх інтервальних значень по свердловині ТГ-1 (рис. 4) показують наявність незначного тренду підвищення щільності з глибиною. У верхній частині свердловини (0 – 100 м) середнє значення інтервальної щільності має показник 2,65–2,67 г/см^3, що пов'язано зі зниженням літостатичного тиску та розущільненням порід – діафторезом. В інтервалі глибин 800 – 1200 м показник підвищується до 2,67 – 2,68 г/см^3, а глибше до забою – до 2,72 – 2,73 г/см^3. Відзначається два інтервали локальних підвищень щільності: на відрізку глибини 150 – 500 м та більш значуще – до 2,84 г/см^3 – на відмітці 1500 – 1600 м. Починаючи з глибини 1200 м відзначається незначне підвищення інтервальної щільності з глибиною. Можливо припустити, що з цієї глибини розпочинає працювати градієнт підвищення щільності з глибиною (вертикальний градієнт щільності порядку 0,01 г/см^3/км відповідно до уявлень Тяпкіна (1998).

Картування докембрійської поверхні і супутнє йому вивчення фізичних властивостей на межі 80–90 рр. минулого століття не дали остаточної відповіді на питання про природу Томаківської регіональної гравітаційної аномалії. Порівняння щільнісних параметрів порід, розвинутих у локальних гравітаційних максимумах і за їх межами, не виявило значних відмінностей.

Для всіх сукупностей порід характерний практично безперервний спектр густини, інтервали яких можуть перекриватися. Частина порід має емпіричні ряди розподілення щільності і магнітних властивостей, значно відмінних, відповідно, від нормального і логнормального законів. Такі породи представлені: гранітоїдами, пегматитами, апліто-пегматитами, аплітами, амфіболітами, сланцями хлорит-актиноліт-тремолітовими, кварц-карбонат-плагіоклаз-хлорит-біотитовими породами і мають значно відмінні від нуля коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Тому інтервали зміни фізичних властивостей окремих різновидів порід часто перекривають один одного.

Результати вивчення фізичних властивостей порід, розкритих пробуреною в центральній частини ТГМ вертикальною свердловиною ТГ-1 глибиною 2000 м, показали:

- фізичні властивості порід загалом аналогічні вивченим по площі;
- значно пониженими порівняно з даними площинного опробування є магнітні властивості деяких магнетитовмісних різновидів мігматитів біотитових, гранітів апліто-пегматоїдних і плагіомігматитів біотитових, що в межах епіцентру максимуму ТГМ викликано певним зубожінням цих порід магнетитом;
- більшість зразків керну зі свердловини ТГ-1 характеризуються незначними варіаціями щільності. На цьому фоні підвищеними значеннями щільності відзначаються тільки амфіболіти, плагіограніти амфіболові, амфібол-біотитові, кристалосланці амфібол-біотитові, які утворюють малопотужні тіла. В найнижчій частині свердловини розріз представлений переважно плагіомігматитами біотитовими із середньою щільністю до 2,75 г/см^3, яка до забою свердловини (2000 м) збільшується до 2,88 г/см^3;
- в магнітному відношенні вздовж стовбура свердловини виділяються три чітко виражені інтервали високомагнітних порід потужністю до 100 м кожний – на глибинах 100–200 м, 1200–1300 м і 1400–1500 м, спричинених переважанням магнітних різновидів гранітів біотитових, плагіомігматитів біотитових і амфіболітів ($æ_{інт.}$ до 3000 х 4π х 10^{-6} Од. СІ). З глибини 1700–1800 м і до забою відзначається закономірне зростання $æ_{інт.}$ до величин $æ$ = 1600 х 4π х 10^{-6} Од. СІ, викликане переважанням магнітних різновидів плагіомігматитів амфіболових, амфібол-біотитових і гнейсів біотит-амфіболових, амфіболових.

Таким чином, дані вивчення фізичних властивостей керну по свердловині ТГ-І свідчать загалом про витриманість щільнісних (σ =2,65–2.70) і магнітних параметрів ($æ$ до 600–700). Відзначаються два інтервали потужністю в перші сотні метрів з підвищеними значеннями щільності і три інтервали з високими значеннями намагніченості. З глибини 1700–1800 м і до забою цієї свердловини відзначається закономірне збільшення щільності і намагніченості кристалічних порід.

У периферійній частині ТГМ передбачається підйом щільних порід, що відзначається концентричними локальними аномаліями Δg_a та просторово пов'язаними з ними геохімічними аномаліями кольорових та рідкісних металів, які є індикаторами глибинного генезису.

Результати вивчення фізичних властивостей геологічного розрізу до глибини 2000 м позволяють надалі вивчити особливості глибинної природи ТГМ шляхом моделювання гравітаційного та магнітного полів та отримати комплексну модель його будови, яка впливає на формування земної кори та корисних копалин.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

Берзенин, Б. З., Воронова, С. Г. и др. (1988). *Составление геологической карты докембрийских образований Приднепровского и Приазовского районов Украинского щита м-ба 1:200 000*. ДНВП "Геоінформ України".

Голиздра, Г. Я. (1988). *Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры*. Недра.

Гравіметрична розвідка "Цифрова гравіметрична карта України". Загальні вимоги. СОУ 73.1-41-04.02.04:2004. (2004). Державний комітет природних ресурсів України.

Ентин, В. А., Гуськов, С. И., Орлюк, М. И., Гинтов, О. Б., & Осьмак, Р. В. (2015). Карта абсолютных значений поля силы тяжести территории Украины и некоторые аспекты её возможной интерпретации. *Геофізичний журнал*, 37(1), 53–61.

Есипчук, К. Е., Орса, В. И., Щербаков, М. Б. и др. (1993). *Гранитоиды Украинского щита, петрохимия, геохимия, рудоносность*. Наукова думка.

Єсипчук, К. Ю., Бобров, О. Б., Степанюк, Л. М., Щербак, М. П., Глеваський, Є. Б., Скобелєв, В. М., Дранник, А. С., & Гейченко, М. В. (2004). *Кореляційна хроностратиграфічна схема раннього докембрію Українського щита*. УкрДГРІ.

Каляєв, Г. І., Крутиховська, З. О., Жуков, Г. В., Прусс, А. К та ін. (1972). *Тектоніка Українського щита*. Наукова думка.

Коваленко, В. Ю. и др. (1986). *Комплексная геологическая карта М 1:50 000 планшетов L-36-22-В,Г; -24-В,Г (Отчет Каховской геолого-геофизической партии № 250/81 о групповой геологической съемке 1981–1986 гг.)*. ДНВП "Геоінформ України".

Крутиховская, З. А. (1971). *Глубинное строение и прогнозная оценка Украинской железорудной провинции*. Наукова думка.

Куприенко, П. Я., Макаренко, И. Б., Старостенко, & В. И., Легостаева, О. В. (2007а). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Украинского щита. *Геофизический журнал*, 29(5), 3–27.

Куприенко, П. Я., Макаренко, И. Б., Старостенко, & В. И., Легостаева, О. В. (2007б). Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинско го щита. *Геофізичний журнал, 29(2),* 17–41.

Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII (А. В. Чекунов, Ред.). (1988). Наукова думка.

Насад, А. Г., Коваленко, В. Ю., & Пигулевский, П. И. (2000). К вопросу о глубинном строении земной коры и верхней мантии Среднеприднепровского геоблока. *Геологический журнал*, 4, 15–22.

Насад, А. Г., Пигулевский, П. И., Кичурчак, В. М., & Радзивилл, А. Я. (1997). О взаимосвязи поверхностных структур докембрийского фундамента Среднеприднепровского и Приазовского геоблоков Украинского шита с поверхностью Мохоровичича. *Геологический журнал*, 1–2, 131–137.

Організація та проведення геологічного до вивчення раніше закартованих площ масштабу 1:200 000, складання та підготовка до видання Державної геологічної карти України масштабу 1:200 000. Інструкція. (1999). Геолком України.

Оровецкий, Ю. П., Красовский, С. С., Калюжная, Л. Т. и др. (1997). Строение и эволюция земной коры Приднепровского палеосвода Украинского щита. *Геофизический журнал*, 19(4), 61–68.

Орса, В. И. (1989). *Гранитообразование в докембрии Среднеприднепровской гранит-зеленокаменной области*. Наукова думка.

Переверзев, С. И. и др. (1992). *Геологическое строение и полезные ископаемые бассейна р. Томаковки. Отчет о результатах ГГК М 1:200 000 Запорожского антиклинория (Томаковский гравитационный максимум) в пределах листов М-36-XXXV; L-36-V*. ДНВП "Геоінформ України".

Пигулевский, П. И. (2012). О результатах магнитотеллурических зондирований в центральной части Среднеприднепровского мегаблока. *Науковий вісник НГУ*, 2, 20–26.

Пигулевский, П. И., & Свистун, В. К. (2014). *Геолого-геофизическая модель Приазовского мегаблока Украинского щита (анализ, моделирование, результаты)*. Ноулидж.

Пігулевський, П. Г. (2022). Геотраверс "Граніт" Одеса – Кривий Ріг – Перещепине. *Геофізичний журнал*, 44(6), 88–100. https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273641

Свистун, В. К., Антонов, В. О., & Пігулевський, П. Г. (2020). Підсумки формування бази гравіметричних даних в Україні. *Геоінформатика*, 75(3), 83–91.

Стандарт комітету природних ресурсів України. Геофізичні дослідження надр. General requirements. СОУ 73.1-41-04.02.04: 2006. (2006). Комітет природних ресурсів України.

Старостенко, В. И., Гинтов, О. Б., Пашкевич, И. К. и др. (2007). Металлогения Украинского щита: закономерности размещения месторождений рудных полезных ископаемых, связь с глубинным строением и динамикой литосферы. *Геофизический журнал*, 29(6), 3–31.

Тектонічна карта України. 1 : 1 000 000 (С. С. Круглов & Д. С. Гурський, Ред.). (2007). УкрДГРІ.

Толстой, М. І., Гасанов, Ю. Л., Костенко, Н. В. та ін. (2003). *Петрохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання*. Київський університет.

Тяпкін, К.Ф. (1998). *Фізика Землі*. Вища школа.

Щербаков, И. Б., Есипчук, К. Е., Орса, В. И. и др. (1984). *Гранитоидные формации Украинского щита*. Наукова думка.

Шумлянська, Л., Пігулевський, П. (2024). Побудова та перші результати інтерпретації тривимірної моделі щільності мантії під Українським щитом. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 105(2), 21–28. http://doi.org/10.17721/1728-2713.105.03

Pigulevskiy, P. I., & Stovas, O. M. (2022). Seismic geotraverse "Granit" (Ukrainian part). Reanimation. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 4, 11–16. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/011

Pigulevskiy, P., & Shumlianska, L. (2024, April). Geodense section of the lithosphere of the Ukrainian shield along the Shepetivka – Zhytomyr – Dnipro – Volnovakha traverse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), Article 012087. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012087

Pihulevskyi, P., Yaremii, S., Tiapkin, O., Logvin, V., & Anisimova, L. (2024, October). Petrophysical Features of the Main Rock Formations of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"* (Vol. 2024, pp. 1–5). EAGE. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510092

Pihulevskyi, P. H., Kendzera, O. V., Babiy, K. V., Anisimova, L. B., & Kyryliuk, O. S. (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

Pihulevskyi, Petro, Yaremii, Serhii, Anisimova, Larysa, Logvin, Vasyl, Kyryliuk, Oleksandr. (2025, October). Petrophysical features of the rocks of the sedimentary cover of the Kryvyi Rih iron ore basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"* (Vol. 2025, pp. 1–5). EAGE. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552071

Shumlianska, L., Pigulevskiy, P., & Vilarrasa, V. (2024). Three-dimensional density model of the mantle beneath the Ukrainian shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 12–18. https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/012

Svistun, V., & Pigulevskiy, P. (2021, May). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dniprogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. In *20th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects* (Vol. 2021, pp. 1–7). EAGE. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202155211132

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.

References

Berzenin, B. Z., & Voronova, S. G. (1988). *Compilation of a geological map of Precambrian formations of the Dnieper and Azov regions of the Ukrainian Shield, scale 1:200 000*. DNVP "Geoinform of Ukraine" [in Russian].

Entin, V. A., Guskov, S. I., Orlyuk, M. I., Gintov, O. B., & Osmak, R. V. (2015). Map of absolute gravity fields values in Ukraine and some aspects of its possible interpretation. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(1), 53–61 [in Russian].

Golizdra, G. Ya. (1988). *Complex interpretation of geophysical fields in the study of the deep structure of the earth's crust*. Nedra [in Russian].

Kalyaev, G. I., Krutykhovska, Z. O., Zhukov, G. V., Pruss, A. K. et al. (1972). *Tectonics of the Ukrainian Shield*. Naukova Dumka [in Ukrainian].

Kovalenko, V. Yu., et al. (1986). *Complex geological map M 1:50 000 tablets L-36-22-B,G; -24-B,G (Report of the Kakhovka geological and geophysical party No. 250/81 on the group geological survey of 1981–1986)*. DNVP "Geoinform of Ukraine" [in Russian].

Krutikhovskaya, Z. A. (1971). *Deep structure and prognostic assessment of the Ukrainian iron ore province*. Naukova Dumka [in Russian].

Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. B., Starostenko, V. I., & Legostaeva, O. V. (2007a). Three-dimensional density model of the earth's crust and upper mantle of the Ukrainian shield. *Geophysical Journal*, 29(5), 3–27 [in Russian].

Kuprienko, P. Ya., Makarenko, I. B., Starostenko, V. I., & Legostaeva, O. V. (2007b). Three dimensional density model of the Earth's crust and upper mantle of the Ingul megablock of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 29(2), 17—41 [in Russian].

Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotraverses IV, VI, VIII (A. V. Chekunov, Ed.). (1988). Naukova Dumka [in Russian].

Nasad, A. G., Kovalenko, V. Yu., & Pigulevskiy, P. I. (2000). On the question of the deep structure of the earth's crust and upper mantle of the Middle Dnieper geoblock. *Geology zhurnal*, 4, 15–22 [in Russian].

Nasad, A. G., Pigulevskiy, P. I., Kichurchak, V. M., & Radziwill, A. Ya. (1997). On the relationship between the surface structures of the Precambrian basement of the Middle Dnieper and Azov geoblocks of the Ukrainian shield with the Mohorovichich surface. *Geology journal*, 1–2, 131–137 [in Russian].

Organization and carrying out of geological to study previously mapped areas at scale 1: 200 000, formation and preparation for publication of the State Geological Map of Ukraine at scale 1: 200 000. Instruction. (1999). Geological Committee of Ukraine [in Ukrainian].

Orovetsky, Yu. P., Krasovsky, S. S., & Kalyuzhnaya, L. T. (1997). Structure and evolution of the earth's crust of the Dnieper paleoarch of the Ukrainian shield. *Geophysical Journal*, 19(4), 61–68 [in Russian].

Orsa, V. I. (1989). *Granite formation in the Precambrian Middle Dnieper granite-greenstone region*. Naukova Dumka [in Russian].

Pereverzev, S. I. et al. (1992). *Geological structure and useful minerals of the Tomakovka River basin. Report on the results of GGK M 1:200 000 of the Zaporizhzhya anticlinorium (Tomakovskiy gravitational maximum) within sheets M-36-XXXV; L-36-V*. DNVP "Geoinform of Ukraine" [in Russian].

Pigulevskiy, P. I. (2012). About the results of the magnetotelluric sounding of central part of the Sredneprіdneprovsky Megablock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 20–26 [in Russian].

Pigulevskiy, P. I. (2022). Geotraverse "Granite-Odesa-Kryvyi Rih-Pereschepine". *Geophysical Journal*, 44(6), 88–100 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.24028/gj.v44i6.273641

Pigulevskiy, P. I., & Svistun, V. K. (2014). *Geological and geophysical model of the Azov megablock of the Ukrainian shield (analysis, modeling, results)*. Knowledge [in Russian].

Pigulevskiy, P. I., & Stovas, O. M. (2022). Seismic geotraverse "Granit" (Ukrainian part). Reanimation. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 4, 11–16. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/011

Pigulevskiy, P., & Shumlianska, L. (2024, April). Geodense section of the lithosphere of the Ukrainian shield along the Shepetivka – Zhytomyr – Dnipro – Volnovakha traverse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1348(1), Article 012087. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1348/1/012087

Pihulevskyi, P., Yaremii, S., Tiapkin, O., Logvin, V., & Anisimova, L. (2024, October). Petrophysical Features of the Main Rock Formations of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"* (Vol. 2024, pp. 1–5). EAGE. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510092

Pihulevskyi, Petro, Yaremii, Serhii, Anisimova, Larysa, Logvin, Vasyl, Kyryliuk, Oleksandr. (2025, October). Petrophysical features of the rocks of the sedimentary cover of the Kryvyi Rih iron ore basin. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2025"* (Vol. 2025, pp. 1–5). EAGE. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552071

Pihulevskyi, P. H., Kendzera, O. V., Babiy, K. V., Anisimova, L. B., & Kyryliuk, O. S. (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

Shcherbakov, I. B., Esipchuk, K. E., Orsa, V. I. et al. (1984). *Granitoid formations of the Ukrainian shield*. Naukova Dumka [in Russian].

Shumlianska, L., & Pigulevskiy, P. (2024). Construction and first interpretation results of the three-dimensional mantle density model under the Ukrainian shield. *Bulletin of Kyiv University. Geology*, 105(2), 21–28 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.105.03

Shumlianska, L., Pigulevskiy, P., & Vilarrasa, V. (2024). Three-dimensional density model of the mantle beneath the Ukrainian shield. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 12–18. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-4/011

Standard of the Committee of Natural Resources of Ukraine. (2004). *Gravimetric exploration "Digital gravimetric map of Ukraine". General requirements. SOU 73.1-41-04.02.04:2004*. State Committee for Natural Resources of Ukraine [in Ukrainian].

Standard of the Committee of Natural Resources of Ukraine. (2006). *Geophysical research of soil. General requirements. SOU 73.1-41-04.02.04:2006*. Committee of Natural Resources of Ukraine [in Ukrainian].

Starostenko, V. I., Gintov, O. B., & Pashkevich, I. K. (2007). Metallogeny of the Ukrainian Shield: patterns of distribution of ore mineral deposits, connection with the deep structure and dynamics of the lithosphere. *Geophysical Journal*, 29(6), 3–31 [in Russian].

Svistun, V., & Pigulevskiy, P. (2021, May). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dniprogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. In *20th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects* (Vol. 2021, pp. 1–7). EAGE. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132

Svistun, V. K., Antonov, V. O., & Pigulevskiy, P. G. (2020). Results of the formation of the gravimetric data base in Ukraine. *Geoinformatics*, 75(3), 83–91 [in Ukrainian].

Tectonic map of Ukraine. 1:1,000,000 (S. S. Kruglov & D. S. Gurskyy, Eds.). (2007). UkrDGRI [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.

Tolstoy, M. I., Hasanov, Y. L., Kostenko, N. V., et al. (2003). *Petrochemistry and petrophysics of granitoids of the Ukrainian shield and some aspects of their practical use*. Kyiv University Publishing and Printing Center [in Ukrainian].

Tyapkin, K.F. (1998). *Physics of the Earth*. Vushca shkola [in Russian].

Yesipchuk, K. E., Orsa, V. I., Shcherbakov, M. B. et al. (1993). *Granitoids of the Ukrainian shield, petrochemistry, geochemistry, ore content*. Naukova Dumka [in Russian].

Yesypchuk, K. Yu., Bobrov, O. B., Stepanyuk, L. M., Shcherbak, M. P., Hlevask, E. B., Skobelev, V. M., Drannyk, A. S., Geychenko, M. V. (2004). *Correlational chronostratigraphic scheme of the early Precambrian of the Ukrainian Shield.* UkrDGRI [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 12.01.26
Прорецензовано / Revised: 13.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Petro PIGULEVSKIY, DSc (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
e-mail: pigulev@ua.fm
S. I. Subbotina Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine

PETROPHYSICAL QUALITIES OF ROCKS WITHIN THE TOMAKIV GRAVITY MAXIMUM

Background. ***The article presents the results of studying the stock and archival materials of geological organizations regarding the physical properties of rocks within the Tomakiv Gravity Maximum (TGM), which is located in the central part of the Middle Dnieper megablock of the Ukrainian Shield. The results of previous geological and geophysical studies, which were obtained in the early 90s of the last century, did not provide an answer to its nature. Therefore, the task of the study was to analyze the materials of petrophysical properties of Precambrian formations on their surface and along the Tomakiv deep well shaft TG-1 to a depth of 2000 m. The aim was also to study the features of the geological structure of the Tomakiv deep well shaft.***

Methods. ***The research was based on the stock and archival materials of the geological organizations "Pivdenukrgeologiya" and "Dniprogeofizika" regarding the physical properties of the rocks that make up the Precambrian surface and section of the Tomakiv Gravity Maximum. Materials of petrophysical properties of Precambrian formations along the shaft of the Tomakiv deep well TG-1 to a depth of 2000 m were carefully collected, analyzed, and reinterpreted from the standpoint of modern hypotheses. Based on statistical processing, magnetic-density properties were combined into a unified petrophysical database.***

Results. ***For the first time, a consistent magnetic-density classification of rocks of the Tomakiv Gravity Maximum and sides of greenstone structures has been obtained, covering more than 30 rock varieties. The existing petrophysical lateral heterogeneity of the structure and its changes in the upper part of the earth's crust are explained by an increase in the percentage composition in terms of its densest components, and not by the influence of the density gradient with depth.***

The properties of magnetite-containing varieties of biotite migmatites, aplite-pegmatoid granites, and biotite plagiomigmatites are significantly reduced compared to the data of planar sampling. This feature is due to the depletion of magnetite in these varieties within local gravity maxima. Two intervals with a thickness of the first hundreds of meters with increased density values and three intervals with high magnetization values are noted. From a depth of 1700–1800 m to the bottom of this well, a regular increase in the density and magnetization of crystalline rocks is noted. In magnetic terms, along the wellbore, three clearly defined intervals of highly magnetic rocks with a thickness of up to 100 m each at depths of 100–200 m, 1200–1300 m, and 1400–1500 m are distinguished, which is due to the predominance of magnetic varieties of biotite granites, biotite plagiomigmatites, and amphibolites.

Conclusions. ***The obtained results, which summarize a significant number of physical properties of the samples, allow for more detailed mapping of the Precambrian surface using gravimagnetic fields during geological exploration in search of minerals. The results of studying the physical properties of the geological section to a depth of 2000 m allow for a new consideration of the features of the deep nature of the Tomakiv Gravity Maximum when modeling its structure using gravitational and magnetic fields.***

Keywords: ***Ukrainian Shield, gravitational field, Tomakiv Gravity Maximum, petrophysical properties, structural-tectonic constructure.***

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.

UDC 550.382.3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.05

Dmytro HLAVATSKYI, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com
Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Viktor YAKUKHNO, Leading Engineer
e-mail: yavick@ukr.net
Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ROCK MAGNETIC STUDY OF KYIV POLISSIA SANDS AND SANDY SOILS

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук К.М. Бондар)

Background. ***Late Pleistocene and Holocene deposits in Ukraine have traditionally been studied in detail using magnetic methods; however, sands and sandy soils have not been sufficiently studied. The purpose of this article is to provide rock magnetic characteristics of sands and sandy soils in the Kyiv Polissia region, northern Ukraine.***

Methods. ***Field work involving sampling from mini-pits and standard laboratory rock magnetic studies (Evans, & Heller, 2003; Maxbauer, Feinberg, & Fox, 2016) have been conducted.***

Results. ***The average magnetic susceptibility values of the Demydiv and Ozera sections fluctuate within insignificant limits ($1–10 \cdot 10^{-8}$ m^3/kg), with higher values observed in soil horizons compared to sands. High values of frequency-dependent magnetic susceptibility of humus horizons of sandy soils (11–13 %) indicate the presence of superparamagnetic magnetite grains formed as a result of pedogenic processes. The S parameter also indicates the dominance of magnetite. The thermomagnetic susceptibility curves are characterized by a Curie point of 675°C and a typical hematite "tail." The SIRM and χ_{ARM} values for the pilot samples indicate their dependence rather on the concentration of ferrimagnetic material: increased values are observed in the upper parts of the sections (humus horizons of soils), decreased values – in sands. This behavior of magnetic properties is explained by local geomorphological conditions, weaker influence of pedogenic processes, and significant impact of physical and chemical weathering processes.***

Conclusions. ***Sand deposits of the Polissia Lowland were formed under conditions of a "transitional" model of magnetic record, which is also characteristic of loess-soil deposits of the Volyn Upland. The sensitivity of rock magnetic and mineralogical properties to local climatic conditions, namely the degree of moisture and watterlogging, has been established, which in the case of the "transitional" model correlates inversely with the content of superparamagnetic grains. For the Kyiv region, the classical pedogenic model of magnetic properties (increase in magnetite content with the degree of pedogenesis) is observed only for loess-soil sections of the Dnieper Upland.***

Keywords: *magnetic susceptibility, Adrenosol, Abruptic Retisol, magnetic minerals, paleoclimate.*

Background

Quaternary deposits in Ukraine are mainly represented by loess-soil sequences covering about 70 % of its area, which have been traditionally comprehensively studied by paleogeographic methods (Bogutskyi, 1986; Bonchkovskyi, 2025; Gerasimenko, 2006, 2022; Gozhyk, Gerasimenko, & Bortnyk, 2019; Matviishyna et al., 2010; Matviishyna, & Doroshkevych, 2019; Sirenko, & Turlo, 1986; Sirenko, 2019; Veklich, 1982). The loess-soil sequences have also been studied in detail using paleomagnetic and rock magnetic methods since the 1960s (see references in Bakhmutov, Hlavatskyi, & Poliachenko, 2023). Previous studies focused on determination of the stratigraphic boundary of the last Matuyama–Brunhes polarity reversal (773 ka), and only in the last two decades the studies appeared devoted to the use of rock magnetic parameters (primarily magnetic susceptibility) as paleoclimatic proxies (see review in Hlavatskyi et al., 2021a), as well as antropogenic pollution indicators (Bondar et al., 2024; Jeleńska et al., 2008; Menshov et al., 2020, 2023). Dozens of sections in the Dnieper Lowland, Dnieper Upland, Black Sea Lowland, and Volyn-Podillia Upland have been investigated so far. However, another widespread Quaternary deposits in Ukraine – sands of different origin – remain insufficiently studied.

In the world literature devoted to environmental magnetism, a few studies have been conducted on sands (Faust et al., 2020; Hamza et al., 2025; Lyons, Oldfield, & Williams, 2010). More studies are devoted to the Holocene climatic evolution based on multi-proxy investigations of sandy and loessic soils (Ahn, Lim, & Kim, 2021; Ahn, Park, & Lim, 2024; Anwar et al., 2018; Buynevich et al., 2023; Chen et al., 2024; Jordanova, & Jordanova, 2021; Song et al., 2024). In Ukraine, magnetic sands from the Northern Black Sea region have been magnetically analyzed (Kurnikov, & Orlyuk, 2011). In northern Ukraine, anisotropy of magnetic susceptibility was investigated at the Pleistocene sequence at Cherepyn (Nawrocki et al., 2019). However, we have not found any magnetic data on sandy soils or sands within the Kyiv Polissia region.

The purpose of this article is to present the magnetic characteristics of sands and sandy soils deposited within the Irpin River valley in northern Kyiv region and to compare them with other Late Pleistocene deposits.

Research objects. A total of three sites, two sites near the village of Demydiv in the Vyshhorod district, and one site at the Ozera cottage cooperative near the village of Rakivka in the Bucha district of the Kyiv region were studied. The study area is located 35 km north of Kyiv, within the Irpin River valley (Fig. 1), slightly northwards from the border between the Dnieper Upland and the Polissia Lowland. The relief of the study area is flat. Coniferous forests and, to a lesser extent, mixed forests are widespread. The study area is characterized by sandy soils with low fertility, formed on glacial and alluvium deposits. The region in general is characterized by Abruptic Retisols according to the WRB classification (WRB, 2022). The climate is temperate continental with warm and humid summers and mild winters. The average annual temperature is +6.5°...+7.5 °C. Annual precipitation is 550...650 mm (Menshov et al., 2024). The territory was temporarily occupied by Russian troops from February 25 to April 1, 2022.

© Hlavatskyi Dmytro, Yakukhno Viktor, 2026

ISSN 1728-3817

The *Demydiv S-1* section (50°43′09.8"N, 30°18′49.9"E) was a temporary mini-excavation on the territory of the Demydiv magnetic station (Center for Collective Use of Magnetometric Equipment of the National Academy of Sciences of Ukraine). The section is 2.2 m thick. It consists (from top to bottom) of sandy soil (Adrenosol according to the WRB classification, WRB, 2022), sand, loamy Gleysol with ochre stripes, and a lower sandy layer with wide iron pines (Fig. 2).

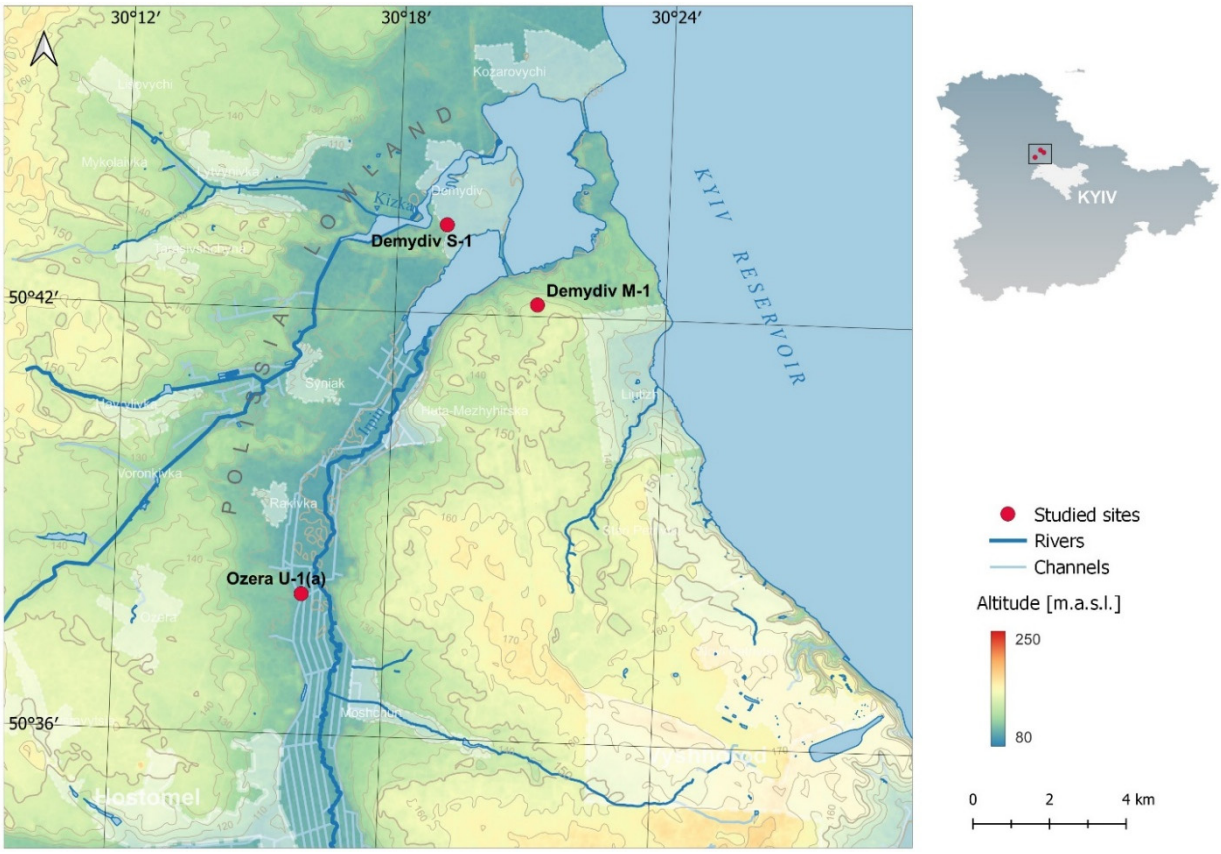


Fig. 1. Location of research objects on the relief map of the northern part of the Kyiv region. The map was created based on Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global elevation data (Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, 2017)

The following objects were processed together with planar sections (profiles and grids) as a part of the PAN.BFB.S.BWZ.394.022.2023 project, implemented in the framework of the Polish Academy of Sciences program to support Ukrainian research teams in cooperation with the US National Academy of Sciences to study potential heavy metal contamination of soils due to military operations (project leader – Ksenia Bondar). Preliminary results of geochemical and magnetic research on surface profiles in this area have been published in (Bondar et al., 2023, 2025; Hlavatskyi et al., 2024; Menshov et al., 2024).

The *Demydiv M-1* outcrop (50°42′10.6"N, 30°21′14.7"E) is a crater with a diameter of 20 m formed by the impact of a Russian X-type missile. At a depth of up to 3 m, the following layers were exposed (from the top to bottom): thin sandy soil (Adrenosol), sand horizon, and hard hydromorphic soil (clayey or loamy Gleysol; Fig. 2).

The *Ozera U-1* and *Ozera U-1a* duplicate sections (50°37′56.9"N, 30°16′07.2"E) were taken from a single mini-excavation with a depth of up to 0.9 m. The sequence is represented by Albic Abruptic Retisol, a sandy horizon, no signs of loamy Gleysol were observed (Fig. 2).

Methods

Fieldwork was conducted in 2022 (Demydiv S-1 section) and in 2023 (other sites). Samples were collected from mini-excavations, and samples from the Demydiv M-1 section were collected from outcrop in the crater resulting from a rocket explosion. Samples weighing 10–25 g were collected every 5 cm (and every 2 cm at the Ozera U-1a section). The samples were sieved through 1 mm mesh screens and placed in non-magnetic zip-lock bags.

Magnetic susceptibility was measured at two frequencies (low frequency – χ_{lf} or χ at 976 Hz; and high frequency χ_{hf} at 15616 Hz) on a MFK-1FB Kappabridge at the Center for Collective Use of Magnetometric Equipment of the National Academy of Sciences of Ukraine (Demydiv village, Kyiv region). The magnetic susceptibility was measured for a total of 87 samples, including 44 samples from the Demydiv S-1 section, 12 samples from the Demydiv M-1, 18 samples from the Ozera U-1, and 13 samples from the Ozera U-1a. Typically for sand horizons, frequency-dependent magnetic susceptibility (χ_{fd}) was not calculated due to abnormally low χ_{hf} values and, accordingly, exceeding the maximum error in measurements.

Then, the material from the pilot sample collection was moved to special plastic cubes with a 2 cm edge for further magnetic mineralogical studies in the paleomagnetic laboratory of the Institute of Geophysics of the Polish Academy of Sciences (Warsaw). Anhysteretic remanent magnetization (ARM) was measured using a LDA5/PAM1 AF Demagnetizer (AGICO, Czech Republic) with a maximum alternating (AC) field of 100 mT and a constant (DC) field of 100 μT, and subsequent measurements on a cryogenic SQUID magnetometer (2G Enterprises, USA) .

Saturation isothermal remanent magnetization (SIRM or M_{rs}) was obtained in a 1 T magnetic field using a MMPM10 Pulsemagnetizer (Magnetic Measurements, UK). Then, anhysteretic magnetic susceptibility, χ_{ARM}, was calculated. The S ratio was calculated as the difference between SIRM in a 1 T magnetic field and the reverse induced saturation magnetization at -300 mT (Evans, & Heller, 2003; Maxbauer, Feinberg, & Fox, 2016).

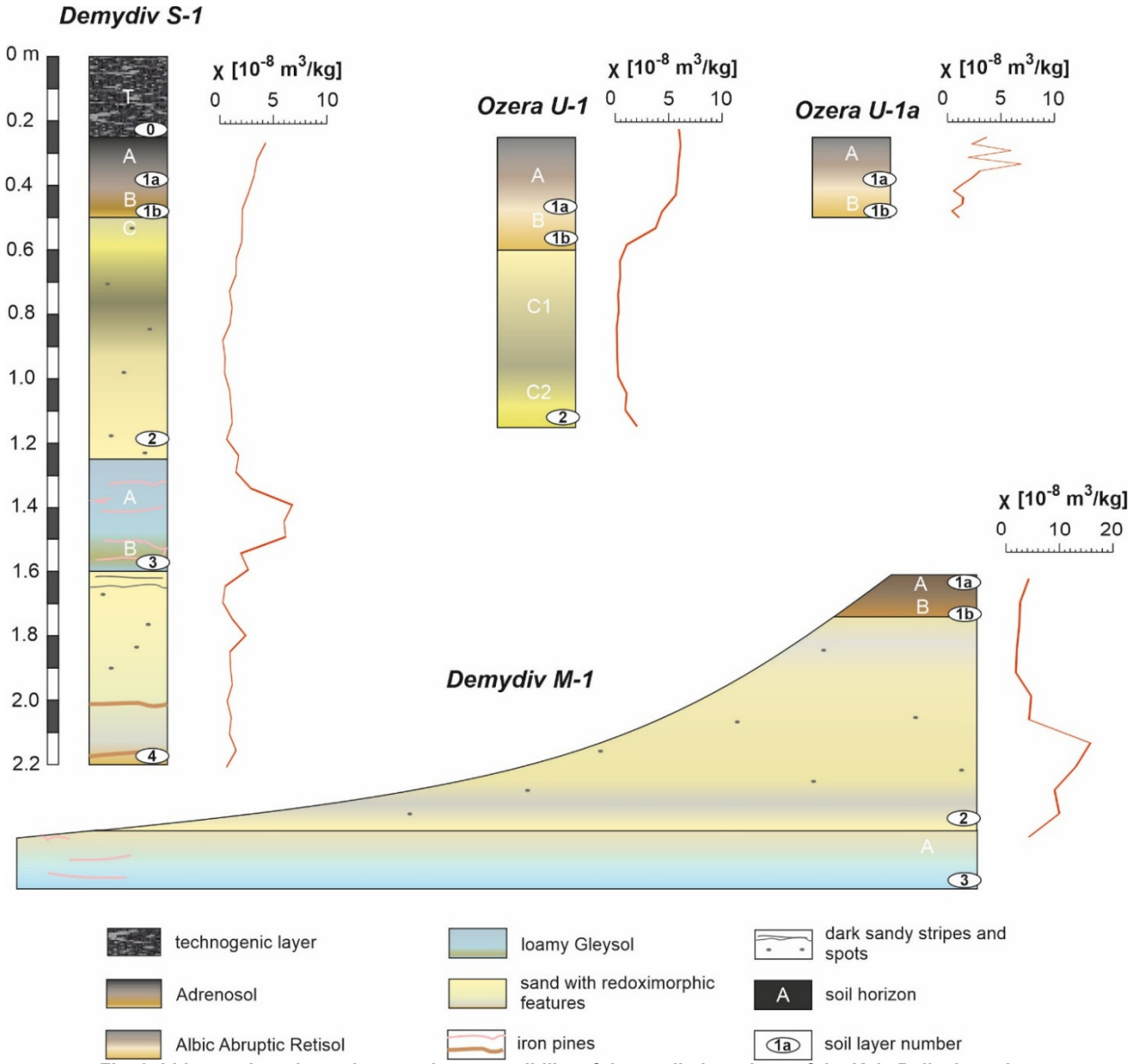


Fig. 2. Lithostratigraphy and magnetic susceptibility of the studied sections of the Kyiv Polissia region

Results

Magnetic susceptibility values vary within a narrow range from 0.1 to 6 m^3/kg in all sections except Demydiv M-1 (Fig. 2). In general, χ tends to decrease in sandy horizons, while it has the highest value in upper soils. Only in the middle part of the Demydiv M1 section, the χ values are slightly increased (up to 16 m^3/kg; Fig. 2), which may be caused by anthropogenic activity. Frequency-dependent magnetic susceptibility as an indicator of pedogenic processes proved to be informative only for the upper sandy soils at the Demydiv S1 and Ozera U-1/1a sites (11.5–13.4 %). The average values of χ and χ_{fd} are given in the Table.

Table

Average values of selected magnetic parameters of the studied sections

Section	n	χ_{lf}, 10^{-8} m^3/kg	χ_{fd}, %	SIRM, 10^{-5} Am^2/kg	χ_{ARM}, 10^{-8} m^3/kg	S
Technogenic layer at Demydiv S-1 (0-20 cm depth)	5	718	2.8			
Demydiv S-1 (20-65 cm depth)	8	2.4	13.4	74.8	26.8	0.99
Demydiv S-1 (below 65 m depth)	30	1.6	≈0			
Demydiv M-1 (upper part)	6	3.0	4.7	123.6	32.1	1.0
Demydiv M-1 (lower part)	5	10.9	2.4	28.4	8.3	1.0
Ozera U-1/1a (upper 20 cm)	5	5.5	11.5	52.9	36.1	0.93
Ozera U-1/1a (below 20 cm depth)	14	1.09	≈0			

ISSN 1728-3817

The SIRM and χ_{ARM} values for the pilot samples indicate rather their direct dependence on the concentration of ferrimagnetic material: increased values are observed in the upper parts of the sections (soils), decreased values in sands (Table). This is explained by local geomorphological conditions, the weak influence of pedogenic processes and, accordingly, a small proportion of organic matter in the soils, as well as the significant influence of gleying processes due to the proximity to the Irpin River and high groundwater circulation.

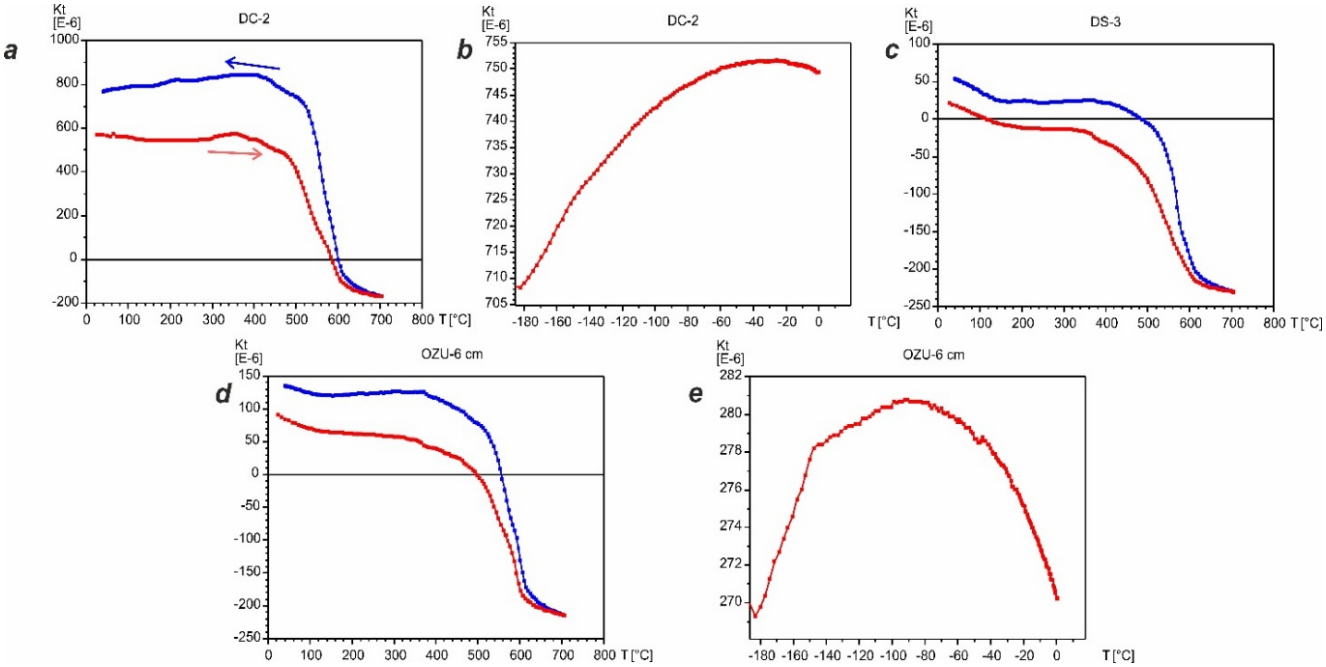


Fig. 3 Thermomagnetic heating and cooling curves (a, c, d) and heating curves at low temperature (b, e) for samples from the Demydiv M-1 (a, b), Demydiv S-1 (c), and Ozera U-1a (d, e) sections

The identification of magnetic minerals in soils is performed using thermomagnetic analysis (the dependence of magnetic susceptibility on the applied temperature) (Fig. 3).

Samples from all locations demonstrate typical pedogenic "behavior" expressed by a hematite "tail" on the heating curves at a temperature of 600–700 °C (Curie point of hematite is 675°C) (Fig. 3). It is noteworthy that the samples are characterized by a high rise of both curves from 0 to 500 °C with a sharp drop to 580–600 °C, with the cooling curve (blue) lying above the heating curve (red) (Fig. 3). This can be explained by the presence of oxidized titanomagnetite and its further oxidation during cooling (McElhinny, & McFadden, 2000).

Changes in magnetic susceptibility values in the low temperature range from -190 to 0 °C (low-temperature analysis) were minimal (up to 3.5–5 %), which is characteristic of fine-grained iron oxides (Eyre, & Shaw, 1994). It should be noted that according to the S parameter (from 0.93 to 1.0; Table), the dominant magnetic mineral in humus horizons is magnetite with a slight admixture of hematite.

Discussion and conclusions

The studied sands and sandy soils of the Kyiv Polissia region are characterized by very low magnetic susceptibility values (within the range of 0.1–16 m^3/kg). The same values are characteristic of soil horizons and pedosediments of the Volyn-Podillia Upland (Bonchkovskyi et al., 2023; Bonchkovskyi, & Hlavatskyi, 2025; Hlavatskyi et al., 2021b). Moreover, in the case of soils of some Volyn sections, it was proved that the influence of imported sand during soil sedimentation was decisive in reducing the values of concentration-sensitive magnetic parameters. In contrast, the majority of loess of Volyn and the soils of the forest-steppe and steppe zones of Ukraine usually have values of $\chi > 25$ m^3/kg. Compared to other loess-soil deposits, similar to Kyiv Polissia sands values are characteristic only of loess horizons in southern Ukraine and partly in the Dnieper Lowland (8–12 m^3/kg; Hlavatskyi, & Bakhmutov, 2020).

Nevertheless, based on the frequency-dependent magnetic susceptibility factor (11–13 %) in the upper humus horizon (A) of sandy soils, the presence of superparamagnetic magnetite grains has been proven, which is an indicator of intense pedogenic processes. As for the lower hydromorphic soil, which is widespread in the area, the magnetite grains were probably destroyed as a result of waterlogging; thus, the magnetic properties of hematite are more pronounced here. We have repeatedly observed a similar pattern of decrease in the concentration of ferrimagnetic minerals due to physical and chemical weathering processes in subaerial sections (Bonchkovskyi, & Hlavatskyi, 2025; Hlavatskyi et al., 2023). A conceptual diagram of the dependence of climatic conditions on soil formation, sand sedimentation, and magnetic properties is shown in Fig. 4.

Therefore, the magnetic properties of sands and sandy soils of the Kyiv Polissia region were formed in accordance with a typical "transitional" model of magnetic record (Bonchkovskyi, & Hlavatskyi, 2025), which is characterized by low magnetic susceptibility values combined with high χ_{fd} and the predominant influence of chemical and physical weathering processes rather than pedogenesis. In the Kyiv region, we propose to draw the boundary between the "transitional" and "pedogenic" models of magnetic record between the Dnipro Upland and the Polissia Lowland.

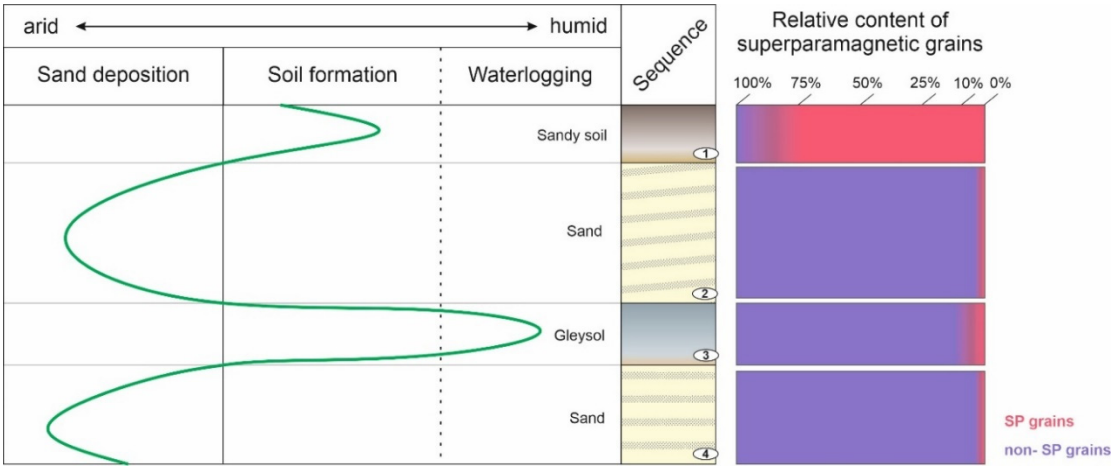


Рис. 4. Conceptual model of moisture dependent and magnetic granulometry transformation processes of sand sequence in the Irpin river valley. The concentration of superparamagnetic (SP) grains is estimated according to the Table 2.6 in Dearing (1999)

Authors' contribution: Dmytro Hlavatskyi – writing, investigation, formal analysis, conceptualization, field work, data curation, supervision; Viktor Yakukhno – validation, methodology.

Acknowledgments. The authors thank Kseniia Bondar for supervision of the project and help with magnetic mineralogical measurements, Lyudmyla Dyachuk for magnetic susceptibility measurements, Oleksandr Menshov, Ievgen Poliachenko and Volodymyr Bakhmutov for help with sampling and logistics of field works, Oleksandr Bonchkovskyi for useful remarks.

Sources of funding. The research was carried out under project PAN.BFB.S.BWZ.394.022.2023, implemented as part of the Polish Academy of Sciences' program to support Ukrainian research teams, carried out in cooperation with the US National Academy of Sciences and international partners. The study of the Demydiv S-1 section was partly supported by the budget allocation from the National Academy of Sciences of Ukraine for research work 0124U000085.

References

Ahn, H.-S., Lim, J., & Kim, S. W. (2021). Magnetic Properties of a Holocene Sediment Core from the Yeongsan Estuary, Southwest Korea: Implications for Diagenetic Effects and Availability as Paleoenvironmental Proxies. *Frontiers in Earth Science*, 9. https://doi.org/10.3389/feart.2021.593332.

Ahn, H.-S., Park, S., & Lim, J. (2024). Magnetic enhancement in paleosols with hydroclimatic and vegetation cover variabilities (Holocene vs. Late MIS 3) in the central Korean Peninsula. *Scientific Reports*, 14(1), 21323. https://doi.org/10.1038/s41598-024-72347-6.

Anwar, T., Kravchinsky, V. A., Zhang, R., Koukhar, L. P., Yang, L., & Yue, L. (2018). Holocene climatic evolution at the Chinese Loess Plateau: Testing sensitivity to the global warming-cooling events. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166, 223–232. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.032.

Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2023). Magnetostratigraphy of the Pleistocene loess-palaeosol sequences in Ukraine and Moldova: A historical overview and recent developments. *Geological Quarterly*, 67(4), 1–19. https://doi.org/10.7306/gq.1705.

Bogutskyi, A. B. (1986). Quaternary cover sediments in Volyn-Podillia. In: D. E. Makarenko (Ed.), *Quaternary deposits of Ukraine* (pp. 121–132). Naukova Dumka [in Russian]. [Богуцкий, А. Б. (1986). Антропогеновые покровные отложения Волыно-Подолии. В Д. Е. Макаренко (Гл. ред.), *Антропогеновые отложения Украины* (с. 121–132). Наук. думка.].

Bonchkovskyi, O. (2025). Late Pleistocene pedogenesis response to millenial-scale climate variability: Evidence from the Volyn sequences (NW Ukraine). *CATENA*, 252, 108836. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108836.

Bonchkovskyi, O., & Hlavatskyi, D. (2025). Late Pleistocene pedogenesis and loess magnetism in northwestern Ukraine. *Quaternary Research*, 125, 56–86. https://doi.org/10.1017/qua.2024.51.

Bonchkovskyi, O., Hlavatskyi, D., Kuraieva, I., Kravchuk, I., & Bonchkovskyi, A. (2023). Lithology, Geochemistry and Magnetic Susceptibility of the Best Developed Late Pleistocene Loess-Palaeosol Sequence in North-Western Ukraine, Novyi Tik. *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2023"*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510099

Bondar, K. M., Bakhmutov, V., Poliachenko, I., Hlavatskyi, D., & Menshov, O. (2025). Magnetic and chemical signals of post-blast residue in soil: A case study from northern Ukraine. *Science of The Total Environment*, 977, 179342. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179342.

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.

Bondar, K., Bakhmutov, V., Menshov, O., Poliachenko, Ie., & 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, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520209.

Buynevich, I. V., Tõnisson, H., Rosentau, A., Hang, T., Kont, A., Tamura, T., Suuroja, S., Palginõmm, V., & Döring, S. F. S. (2023). Rapid Magnetic Susceptibility Characterization of Coastal Morphosedimentary Units at Two Insular Strandplains in Estonia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 232. https://doi.org/10.3390/jmse11020232.

Chen, D., Lu, R., Ma, L., & Ding, Z. (2024). Holocene climate change in the Hunshandake Sandy Land, Northeast China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 643, 112182. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2024.112182.

Dearing, J. A. (1999). Environmental Magnetic Susceptibility Using the Bartington MS2 System, 2nd ed. Chi Publishing.

Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. (2017). *Landsat 8 Operational Land Imager / Thermal Infrared Sensor Level-1, Collection 1* [Tiff]. U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.5066/F71835S6.

Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Elsevier.

Eyre, J. K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess – the role of γFe2O3? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265–271.

Faust, D., Pachtmann, M., Mettig, G., Seidel, P., Bouaziz, M., Espejo, J. M. R., Olmo, F. D. D., Roettig, C., Kreutzer, S., Hambach, U., & Meszner, S. (2020). Sandy soils in silty loess: The loess system of Matmata (Tunisia). *Quaternaire*, 31/3, 175–186. https://doi.org/10.4000/quaternaire.14217.

Gerasimenko, N. (2006). Upper Pleistocene loess–palaeosol and vegetational successions in the Middle Dnieper Area, Ukraine. *Quaternary International*, 149(1), 55–66. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2005.11.018.

Gerasimenko, N. P. (2022). *Paleogeography of the Quternary period of Ukraine (paleolandscapes).* Print-Servis [Ukrainian]. [Герасименко, Н. П. (2022). Палеогеографія четвертинного періоду України (палеоландшафти). Принт-Сервіс].

Gozhyk, P. F., Gerasimenko, N. P., Bortnyk, S. P. (2019). Quaternary geology. PPC "Kiivskyi University" [in Ukrainian]. [Гожик П. Ф., Герасименко Н. П., Бортник С. Ю. (2019). Четвертинна геологія. ВПЦ "Київський університет"].

Hamza, A. H., Menesi, A. M., Aalaf, A. H. E., Elbeltagi, A., Elwakeel, A. E., Salem, A., Dewidar, A. Z., Taha, M. F., El-Shinawy, D. M., Eid, M. H., Al-Othman, A. A., & Fekry, W. M. E. (2025). Influence of the magnetic field on the characteristics of sandy soil, groundwater, fruit quality, and peach water productivity at different irrigation distances in a desert environment. *Applied Water Science*, 15(9), 233. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02593-0.

Hlavatskyi, D. V., & Bakhmutov, V. G. (2020). Magnetostratigraphy and magnetic susceptibility of the best developed Pleistocene loess-palaeosol sequences of Ukraine: Implications for correlation and proposed chronostratigraphic models. *Geological Quarterly*, 64(3), 723–753 https://doi.org/10.7306/gq.1544.

Hlavatskyi, D. V., Gerasimenko, N. P., Bakhmutov, V. G., Bonchkovskyi, O. S., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Mychak, S. V., Kravchuk, I. V., & Cherkes, S. I. (2021a). Significance of the Ukrainian loess-palaeosol sequences for Pleistocene climate reconstructions: Rock magnetic, palaeosol and pollen proxies. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 3–26. https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236378.

Hlavatskyi, D. V., Stepanchuk, V. N., Kuzina, D. M., Poliachenko, I. B., Shpyra, V. V., Skarboviychuk, T. V., Yakukhno, V. I., & Bakhmutov, V. G. (2021b). Rock magnetic and palaeomagnetic studies of loess-palaeosol

sections–Lower Palaeolithic sites within the Southern Bug Valley (Medzhybizh, Holovchyntsi). *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(1), 3–37. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225539

Hlavatskyi, D., Gerasimenko, N., Bakhmutov, V., Poliachenko, I., & Cherkes, S. (2023). Extremely Low Magnetic Susceptibility in the Lubny (S5, Mis 13) Pedocomplex at the Type Locality Vyazivok (Central Ukrainian Loess Belt). *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2023"*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023510080.

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"*, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510067.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Bondar, K., & Matviishina, Z. (2008). Magnetic structure of polluted soil profiles from Eastern Ukraine. *Acta Geophysica*, 56(4), 1043–1064. https://doi.org/10.2478/s11600-008-0036-8.

Jordanova, D., & Jordanova, N. (2021). Updating the significance and paleoclimate implications of magnetic susceptibility of Holocene loessic soils. *Geoderma*, 391, 114982. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114982.

Kurnikov, Y. A., & Orlyuk, M. I. (2011). Magneto-mineralogical characteristics, classification and use of natural magnetic sands. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 33(1), 39–53 [in Russian]. [Курников, Ю. А., Орлюк, М. И. (2011). Магнитно-минералогическая характеристика, классификация и использование природных магнитных песков. Геофизический журнал, 33(1), 39–53].

Lyons, R., Oldfield, F., & Williams, E. (2010). Mineral magnetic properties of surface soils and sands across four North African transects and links to climatic gradients. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(8). https://doi.org/10.1029/2010GC003183.

Matviishyna, Zh. M., & Doroshkevych, S. P. (2019). Micromorphological peculiarities of the Pleistocene soils in the Middle Pobuzhzhya (Ukraine) and their significance for palaeogeographic reconstructions. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(2), 327–347.

Matviishyna, Zh. M., Gerasimenko, N. P., Perederyi, V. I., Bragin, A. M., Ivchenko, A. S., Karmazinenko, S. P., Nagirnyi, V. M., & Parkhomenko, O. G. (2010). Spatio-temporal correlation of Quaternary palaeogeographic conditions on the territory of Ukraine. Naukova Dumka [in Ukrainian]. [Матвіїшина, Ж. М., Герасименко, Н. П., Передерій, В. І., Брагін, А. М., Івченко, А. С., Кармазиненко, С. П., Нагірний, В. М., & Пархоменко, О.Г. (2010). Просторово-часова кореляція палеогеографічних умов четвертинного періоду на території України. Наукова думка].

Maxbauer, D.P., Feinberg, J.M., & Fox, D.L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews,* 155, 28–48. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014

McElhinny, M. W., & McFadden, P. L. (2000). *Paleomagnetism: Continents and Oceans*. Academic Press.

Menshov, O., Bondar, K., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., & Poliachenko, I. (2024). 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. (2024). Магнітно-мінералогічні властивості ґрунтів київщини, уражених військовими діями. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(106), 5–12]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.01

Menshov, O., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., & Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 182. https://doi.org/10.1007/s12665-020-08924-5.

Menshov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Tonkha, O., Ivanik, O., Pereira, P., Dindaroglu, T., Pastushenko, T., & Eiben, H. (2023). Distribution of soil magnetic susceptibility as a pollution indicator in the urban and tourist city of Lviv, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), 486. https://doi.org/10.1007/s12665-023-11176-8.

Nawrocki, J., Bogucki, A. B., Gozhik, P., Łanczont, M., Pańczyk, M., Standzikowski, K., Komar, M., Rosowiecka, O., & Tomeniuk, O. (2019). Fluctuations of the Fennoscandian Ice Sheet recorded in the anisotropy of magnetic susceptibility of periglacial loess from Ukraine. *Boreas*, 48(4), 940–952. https://doi.org/10.1111/bor.12400.

Sirenko, N. A., & Turlo, S. I. (1986). *Successions of soils and vegetation of Ukraine during the Pliocene and Pleistocene*. Naukova Dumka [in Russian]. [Сиренко, Н. А., Турло, С. И. (1986). Развитие почв и растительности в плиоцене и плейстоцене. Наукова думка]

Sirenko, O. (2019). Changes in Pleistocene vegetation and climate of Ukraine in the range of 1.8–0.4 million years. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28, 355–366. https:// doi.org/10.15421/111934.

Song, H., Duan, M., Liu, M., Liu, L., Chen, Z., Xin, Y., Zhao, X., Zhang, H., & Han, S. (2024). Grain size and magnetic susceptibility characteristics of Bei'an loess in northern Songnen Plain and their palaeoenvironmental significance. *Fifth International Conference on Green Energy, Environment, and Sustainable Development (GEESD 2024)*, 13279, 688–698. https://doi.org/10.1117/12.3044502.

Veklich, M. F. (1982). *Paleostages and stratotypes of the soil formations of the Upper Cenozoic*. Naukova Dumka [in Russian]. [Веклич, М. Ф. (1982). Палеоэтапность и стратотипы почвенных формаций верхнего кайнозоя. Наукова думка].

WRB. (2022). World Reference Base for Soil Resources. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. 4th Edition, International Union of Soil Sciences (IUSS).

Отримано редакцією журналу / Received: 14.01.26
Прорецензовано / Revised: 15.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Дмитро ГЛАВАЦЬКИЙ, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

Віктор ЯКУХНО, провід. інж.
e-mail: yavick@ukr.net
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

ПЕТРОМАГНІТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПІСКІВ І ПІЩАНИХ ҐРУНТІВ КИЇВСЬКОГО ПОЛІССЯ

В с т у п . ***Пізньоплейстоценові і голоценові відклади на території України традиційно детально досліджені магнітними методами, однак піски і піщані ґрунти вивчені недостатньо. Метою статті є надання петромагнітної характеристики пісків і піщаних ґрунтів півночі України – Київського Полісся.***

М е т о д и . ***Проводились польові роботи з відбором зразків із міні-шурфів, стандартні лабораторні петромагнітні дослідження (Evans, & Heller, 2003; Maxbauer, Feinberg, & Fox, 2016).***

Р е з у л ь т а т и . ***Середні значення магнітної сприйнятливості розрізів Демидів і Озера коливаються в незначних межах (1 – 10 · 10^{-8} m^3/kg), підвищені значення спостерігаються у ґрунтових горизонтах порівняно з пісками. Високі значення частотно-залежної магнітної сприйнятливості гумусових горизонтів піщаних ґрунтів (11–13 %) вказують на наявність суперпарамагнітних зерен магнетиту, утворених унаслідок педогенних процесів. Параметр S теж вказує на домінацію магнетиту, однак для кривих залежності магнітної сприйнятливості від температури характерна точка Кюрі 675 °C і типовий гематитовий "хвіст". Величини SIRM та χ_{ARM} для пілотних зразків вказують на їх залежність від концентрації феримагнітного матеріалу: підвищені значення спостерігаються у верхніх частинах розрізів (гумусових горизонтах ґрунтів), понижені – у пісках. Така поведінка петромагнітних властивостей пояснюється місцевими геоморфологічними умовами, слабшим впливом педогенних процесів і суттєвою дією процесів фізичного та хімічного вивітрювання.***

В и с н о в к и . ***Піщані відклади Поліської низовини формувались в умовах "перехідної" моделі запису магнітних властивостей, яка притаманна також лесово-ґрунтовим відкладам Волинської височини. Встановлено чутливість магнітно-мінералогічних властивостей порід до місцевих кліматичних умов, а саме ступеня зволоження і підтоплення, які у випадку "перехідної" моделі зворотно корелюють із вмістом суперпарамагнітних зерен. Для Київського регіону класична педогенна модель магнітних властивостей (ріст вмісту магнетиту із ступенем педогенезу) спостерігається лише для лесово-ґрунтових розрізів Придніпровської височини.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***магнітна сприйнятливість, піщаний ґрунт, дерново-підзолистий ґрунт, магнітні мінерали, палеоклімат.***

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

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

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.048
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.06

Микола БУРЛУЦЬКИЙ, канд. геол. наук
ORCID ID: 0009-0000-6718-3006
e-mail: Nikolay2205@i.ua
Державна служба геології та надр України, Київ, Україна

ГЕРМАНІЙ У БУРОМУ ВУГІЛЛІ. ЕВОЛЮЦІЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ЙОГО ВИЛУЧЕННЯ

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

В с т у п . ***Германій належить до переліку критичної сировини, визначеному Європейським Союзом (The European Commission, 2024). Дефіцит германію на світовому ринку зумовлює необхідність диверсифікації джерел його постачання та розвитку національних технологій з видобування цього елемента. Очікується, що майбутній попит на германій зростатиме, головним чином завдяки розвитку штучного інтелекту (вдосконалення високопродуктивних мікрочіпів та фотонних компонентів) та систем зв'язку 5G/6G (високошвидкісні радіо- та оптичні мережі), а також підвищенню попиту з боку побутової електроніки (оптичні волокна, ІЧ-камери, оптичні компоненти), військового і оборонного секторів (ІЧ-датчики, системи нічного бачення, оптичні технології) та багатоперехідних сонячних елементів. За оцінками спеціалістів 60–75 % світового виробництва германію походить із цинкових руд, а решта – з летючої золи вугілля. Інші потенційні джерела германію включають залишки рафінування цинку, свинцю, міді, срібла, золота та нікелю. Вугілля було визначено як потенційне джерело германію ще в 1930-х рр. минулого століття. Сьогодні воно стало важливим джерелом германію. Майже дві третини загального обсягу первинного виробництва германію в Китаї припадає на германієвмісне вугілля (113 т Ge у 2019 р.), тоді як національні запаси оцінюються в 6670 т Ge (у вугільній золі). Останні прогнози вказують на зростання в подальшому внеску вугілля у виробництво германію. Зокрема, прогнозується, що до 2200 р. вугілля може постачати близько 16 000 т Ge, що можна порівняти з 17 000 т Ge, що буде забезпечуватися сульфідними цинковими рудами.***

М е т о д и . ***У статті розглянуто питання еволюції технологій вилучення германію з бурого вугілля у контексті формування сучасної мінерально-сировинної бази України. Проаналізовано основні етапи розвитку методів вилучення германію: від традиційних кислотно-гідрометалургійних технологій середини XX ст. до сучасних біотехнологічних, електрохімічних і мембранних методів, орієнтованих на зниження екологічного впливу.***

Р е з у л ь т а т и . ***Наведено результати систематизації вітчизняних і зарубіжних досліджень, виконано порівняння ефективності технологій у різні історичні періоди. Здійснено дослідження щодо закономірностей поширення германію в бурому вугіллі Закарпаття, а також запровадження сучасних екологічно безпечних методів його вилучення, виходячи з гірничо-геологічних умов рідкіснометалічного зруденіння та встановлених фактичних вмістів германію.***

В и с н о в к и . ***Встановлено, що перспективними напрямами розвитку є комплексна переробка бурого вугілля та відходів золо-шлакових матеріалів із застосуванням принципів "Zero-Waste" і замкнених виробничих циклів. На прикладі буровугільних родовищ Закарпаття (Біганське, Новоселицьке) визначено закономірності поширення германію та обґрунтовано доцільність упровадження екологічно безпечних технологій його вилучення. Отримані результати можуть бути використані для розробки національних стратегій у сфері критичної сировини та підготовки до інтеграції України в Європейський простір сталого надрокористування.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***буре вугілля, германій, критична сировина, методи вилучення, екологічно безпечні технології, Закарпаття.***

Вступ

Германій належить до переліку критичної сировини, визначеної Європейським Союзом у *European Critical Raw Materials Act* (The European Commission, 2024). Дефіцит германію на світовому ринку зумовлює необхідність диверсифікації джерел його постачання та розвитку національних технологій з видобування цього елемента.

Германій – історично важливий напівпровідник та новаторський матеріал у розвитку сучасної електроніки, який відіграв ключову роль у створенні перших діодів і транзисторів для підсилення та випрямлення електричних сигналів (Haller, 2006). Сьогодні германій та його основні сполуки – оксид германію (GeO_2), хлорид германію ($GeCl_4$) та сплави (SiGe) – є важливими для передових сучасних технологій та застосувань, пов'язаних з енергетикою (Benedikovic et al., 2021; Chen et al., 2022; Cook, 2022; Rosenberg, 2009; Yan et al., 2024), зокрема в електроніці, оптоелектроніці та фотоелектричних системах.

Глобальне виробництво рафінованого германію є відносно невеликим, але з початку його виробництво доволі коливалося, хоча загалом зростало протягом останніх 25 років, досягнувши 140 тонн у 2021 р. (Arbuzov, & Ershov, 2007). Водночас Китай домінує на ринку, постачаючи 93,5 % металу (2022), далі йдуть Росія (3,6 %), Японія та США (по 1,4 %) (Distribution of Germanium Production…, 2025).

Ціна германію на кінець 2024 р. становила 3885,6 дол./кг, при цьому з січня 2020 р. ціни на германій відповідно до (Germanium Prices…, 2024; Robla, Alonso, & Alguacil, 2024) виросли майже на 90 %.

Очікується, що майбутній попит на германій зростатиме, переважно завдяки розвитку штучного інтелекту (вдосконалення високопродуктивних мікрочіпів і фотонних компонентів) та систем зв'язку 5G/6G (високошвидкісні радіо- та оптичні мережі), а також підвищенню попиту з боку побутової електроніки (оптичні волокна, ІЧ-камери, оптичні компоненти), військового і оборонного секторів (ІЧ-датчики, системи нічного бачення, оптичні технології) та багатоперехідних сонячних елементів (Guzik, Burkiewicz, & Szlugaj, 2021; Patel, & Karamalidis, 2021; Sverdrup, & Haraldsson, 2024; Wong, Li, & Zeng, 2025).

Однак ситуація з постачанням нещодавно ускладнилася після того, як Китай запровадив обмеження на

© Бурлуцький Микола, 2026

експорт германію із серпня 2023 р., що збільшило ризики безперервності поставок та змусило внести відповідні зміни до ланцюгів постачання германію (Cui, & Jiang, 2025; Mei et al., 2024; Nassar et al., 2024; Regulation (EU) 2024/1252…, 2025; Umicore and STL…, 2025). В результаті експорт металевого германію з Китаю за рік до серпня 2024 р. знизився приблизно на 55 % (до 16,7 т) порівняно з аналогічним періодом 2023 р., причому більша частина експорту (65 %) була спрямована до Європейського Союзу (Бельгія, Німеччина) (National Minerals Information Center, 2025).

У 2024 р. Бельгія уклала партнерство з Демократичною Республікою Конго для переробки германію із залишків гірничодобувної промисловості, прагнучи до річного виробництва 30 т Ge, що потенційно забезпечує 30 % світового попиту (Tossou, 2025; Umicore and STL Sign…, 2025;)

Тим часом ціна на германій у березні 2025 р. зросла до 4150 дол./кг, що приблизно на 75 % більше, ніж у січні 2023 р. (Germanium Prices…, 2025).

За оцінками (Mei et al., 2024; Sverdrup, & Haraldsson, 2024) 60–75 % світового виробництва германію походить із цинкових руд, а решта — з летючої золи вугілля. Інші потенційні джерела германію включають залишки рафінування цинку, свинцю, міді, срібла, золота та нікелю (Germanium. SCRREEN3…, 2025).

Вугілля було визначено як потенційне джерело германію ще в 1930-х рр. минулого століття (Lin, Soong, & Granite, 2018). Сьогодні воно стало важливим джерелом германію. Майже дві третини загального обсягу первинного виробництва германію в Китаї припадає на германієвмісне вугілля (113 т Ge у 2019 р.) (Wong, Li, & Zeng, 2025), тоді як національні запаси оцінюються в 6670 т Ge (у вугільній золі) (Patel, & Karamalidis, 2021).

Росія має найбільшу частку активних і потенційних ресурсів германію у вугіллі (17 500 т) (Patel, & Karamalidis, 2021) у кількох германієвмісних вугільних пластах (Seredin, & Finkelman, 2008).

США не виробляють германій з вугілля, але їхні запаси германію у вугіллі оцінюються приблизно в 1703000 т (Lin et al., 2018). Однак фактична кількість, що вилучається, ймовірно, набагато нижча, оскільки лише 16 % зразків у Базі даних якості вугілля Геологічної служби США (COALQUAL 3.0) говорить про вміст 10–235 ppm Ge (Patel, & Karamalidis, 2021).

Останні прогнози вказують на зростання в подальшому внеску вугілля у виробництво германію (Sverdrup, & Haraldsson, 2024). Зокрема, прогнозується, що до 2200 р. вугілля може постачати близько 16 000 т Ge, що можна порівняти з 17 000 т Ge, що буде забезпечуватися сульфідними цинковими рудами (Frenzel, Ketris, & Gutzmer, 2014).

Світові запаси германію в бурому вугіллі (на основі китайських і російських запасів вугілля із вмістом щонайменше 200 ppm Ge) оцінювалися в 104 000 т. Однак аналогічні розрахунки не могли бути проведені для кам'яного вугілля, оскільки не було відомо жодної шахти, яка б видобувала вугілля з такою високою концентрацією германію.

Відповідно до (Arbuzov, & Ershov, 2007) існують три великі родовища вугілля, що містять германій: родовище Спецуглі на Далекому Сході Росії, родовище Вулантуга у Внутрішній Монголії (Північний Китай) та родовище Ліньцан у провінції Юньнань (Південно-Західний Китай).

Огляд останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття науковий інтерес до германію як стратегічного критичного елемента суттєво зріс. Це зумовлено глобальними трендами розвитку високотехнологічних галузей: фотоніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки та оборонних систем. У цьому контексті буре вугілля та золо-шлакові відходи розглядаються як альтернативні джерела германію, що не потребують глибокої переробки руд та можуть забезпечити підвищення ресурсної доступності.

Сучасні дослідження (2020–2025 рр.) відображають кілька ключових тенденцій:

1. Геохімічні аспекти та мінеральні форми германію. Низка робіт присвячена уточненню форм перебування германію у вугіллі, зокрема його зв'язку з органічною речовиною, каолінітами та сульфідними компонентами (Бурлуцький, 2024; Левицкий, 1960; Li et al., 2022;). Дослідники відзначають, що органічно зв'язаний германій є найбільш мобільним у процесах вилуговування та термічної обробки.

2. Технологічні підходи до вилучення. Оновлені гідрометалургійні схеми, що включають лужне, кислотне та комбіноване вилуговування, демонструють зростання ефективності завдяки оптимізації температурних режимів, pH-середовища та застосуванню комплексотвірних реагентів. Паралельно активно розвиваються термохімічні підходи, зокрема контрольований піроліз і волатилізація германію у вигляді летких сполук (Li et al., 2022; Zhang et al., 2020).

3. Екологічні та "зелені" технології. Новітні роботи демонструють перспективність біовилуговування із залученням бактерій Acidithiobacillus та застосування мембранних фільтраційних систем для селективного вилучення Ge з низьких концентрацій у технологічних розчинах. Ці підходи дозволяють зменшити кількість токсичних викидів та забезпечити циркуляцію реагентів у замкненому циклі (Robla, Alonso, & Alguacil, 2024; Rudnik, 2025).

4. Комплексна переробка та Zero-Waste концепція. Науковці підкреслюють важливість поєднання вилучення германію з утилізацією золи, виробництвом будівельних матеріалів та виділенням супутніх критичних елементів, таких як Ga, In, REE. Такі підходи відповідають сучасним європейським вимогам сталого надрокористування (Jiang, Zhang, & Liu, 2021; Rudnik, 2025; Yan et al., 2020).

Загалом огляд літератури свідчить, що екологічно безпечні технології вилучення германію з бурого вугілля стають ключовим напрямом досліджень, спрямованим на заміщення традиційних енергоємних процесів та забезпечення ресурсної незалежності країн ЄС, включно з Україною.

Методи

Проведено аналіз попередніх досліджень як вітчизняних, так і закордонних авторів.

Виконано систематизацію технологій та методів вилучення германію, зокрема з бурого вугілля.

Розглянуто хронологію змін, що відбулися в часі у технологіях вилучення германію.

Здійснено власні дослідження щодо закономірностей поширення германію в бурому вугіллі Закарпаття, а також стосовно запровадження сучасних екологічно безпечних методів вилучення, виходячи з гірничо-геологічних умов рідкіснометалічного зруденіння та встановлених фактичних вмістів германію.

З цього приводу варто зазначити те, що наявність германію у вугіллі не обов'язково означає, що його фактичне та економічно вилучення є вигідним, оскільки рівень вилучення безпосередньо пов'язаний з граничним вмістом (Rudnik, 2025).

Френцель та інші (Frenzel et al., 2014) розподілили вугілля на три групи залежно від вмісту германію: 8–32 ppm, 32–200 ppm та понад 200 ppm, що вказує на різні рівні

екстрагованого германію на рівні 13 %, 33 % та 100 % відповідно. Значення 300 ppm Ge у вугільній золі було рекомендовано як граничний вміст (Dai et al., 2018), Лін та інші (Lin et al., 2018) оцінили, що цей поріг відповідає 41 ppm германію у вугіллі, припускаючи середній вихід золи близько 13 %.

Для китайського вугілля 100 ppm було заявлено як мінімальний промисловий критерій (Li et al., 2022). Разом з тим Шпірт та інші (Shpirt et al., 2013) запропонували мінімальні концентрації германію у вугіллі та летючій золі на рівні 30 ppm та 100 ppm відповідно. У свою чергу, Саліхов та інші (Salikhov et al., 2021) рекомендували вміст Ge у 10 ppm для вугілля, як такий, що становить практичний інтерес.

У золі деяких сортів вугілля вміст германію досягає 1 %, а зола колумбійського лігніту містить його від 2 до 9 %. При отриманні генераторного газу в процесі газифікації кам'яного вугілля і спалюванні коксу при обмеженому доступі повітря германій і галій у вигляді оксидів осідають у пиловловлювачах і димарях разом з леткими компонентами золи. При цьому понад 60 % германію виноситься разом з газами та осідає в пиловловлювачах і димарях.

У Закарпатському буровугільному басейні германієвмісні родовища приурочені до відкладів ільницької світи неогену Чоп-Мукачівської та Солотвинської западин, де представлені Новоселицьким і Біганським буровугільними родовищами. Вміст германію в бурому вугіллі Новоселицького родовища досягає 280 г/т, Біганського родовища, як одного з найперспективніших на германій буровугільних родовищ, – до 1000 г/т (Бурлуцький, 2024).

Варто зазначити, що германій у значних кількостях трапляється не тільки в бурому вугіллі (лігнітах), але й у вуглистих глинах, де концентрація германію досягає 200 г/т (Левицкий, 1960).

У 1969 р. Закарпатською ГРЕ на Біганському родовищі виконувалися роботи, за результатами яких у 1969 р. було складено звіт "Про попередню розвідку Біганського родовища германієносних лігнітів" (Левицкий та ін., 1969), в якому підрахунок запасів виконано станом на 01.05.1969.

Враховуючи, що найбільший вміст германію в бурому вугіллі (лігнітах) в Україні встановлено саме в Закарпатті, в регіоні, де значну частину території займають землі природно-заповідного та лісового фонду, в межах цих земельних ділянок розташовано багато реакреаційних зон, санаторіїв, баз відпочинку тощо, тому виникає необхідність у запровадженні саме сучасних ефективних та екологічно безпечних технологій і методів вилучення германію, у разі необхідності вилучення його та інших цінних компонентів, що присутні тут.

Мета дослідження: провести аналіз сучасних технологій та методів вилучення германію, зокрема з бурого вугілля, з метою комплексного та ефективного використання його не тільки як джерела отримання теплової енергії, а також сировини для вилучення рідкісних, розсіяних, зокрема і германію, а також рідкісноземельних елементів.

Наукова новизна дослідження полягає в систематизації історичного розвитку технологій вилучення германію, порівнянні їх ефективності, а також у визначенні екологічно безпечних напрямів для подальшого впровадження у промисловість. Такий підхід відповідає принципам циркулярної економіки та стратегії *European Green Deal*.

Європейська зелена угода, представлена у грудні 2019 р., є флагманською стратегією Європейського Союзу щодо переходу економіки до кліматичної нейтральності до 2050 р. Це не просто екологічна ініціатива, а комплексний план економічної та промислової трансформації, спрямований на модернізацію економіки ЄС, підвищення ефективності використання ресурсів та відокремлення зростання від деградації навколишнього середовища

У 2021 р. ЄС запровадив "Зелену угоду для України", що передбачає діалог щодо впровадження кліматичної нейтральності в Україні та інтеграції українських екологічних і кліматичних політик до загальноєвропейських стандартів (Resource, & Analysis Center…, 2021). Вона спрямована на перетворення економіки України відповідно до Європейського зеленого курсу *(European Green Deal)*, що має на меті досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. Зелена угода для України включає перехід до сталої, низьковуглецевої економіки, розвиток відновлюваної енергетики та поліпшення екологічної ситуації, хоча процес впровадження в Україні ускладнений війною (https://eu4ukraine.eu/greengeal-ua).

Результати

Германій унаслідок незначного вмісту в земній корі й геохімічної спорідненості з деякими дуже поширеними елементами виявляє обмежену здатність до утворення власних мінералів, проникаючи в кристалічні решітки інших мінералів. Тому власні мінерали германію трапляються вкрай рідко.

Уміст германію у вугіллі різних пластів варіює в широкому діапазоні. У різні часи на етапах розвідувальних робіт та на стадії освоєння родовищ вугілля тривали дослідження вмісту германію у вугіллі для його подальшого вилучення.

Германій є важливим елементом у сучасних технологіях, зокрема в оптиці, електроніці та сонячній енергетиці. З розвитком цих галузей попит на германій значно зріс, що стимулювало пошук ефективних методів його вилучення з різних джерел, включаючи буре вугілля. Германій у бурому вугіллі часто супроводжується іншими рідкісними та рідкісноземельними елементами, що робить такі родовища перспективними для комплексного видобутку.

Залежно від складу вихідної сировини застосовують різні способи первинного оброблення матеріалу для отримання багатших за вмістом германію продуктів – германієвих концентратів. Це може бути вилуговування сірчаною кислотою або вилучення германію методами екстракції та сорбції. Супутнє вилучення германію з вугілля, продуктів його перероблення і шахтних вод нині цілком реальне, і може сприяти підвищенню рентабельності роботи вугільних підприємств (Васильєва, 2019).

Германій – це стратегічний метал, і його вилучення з бурого вугілля має значну історію інновацій. Протягом останніх десятиліть технології вилучення германію з бурого вугілля зазнали значних змін, спрямованих на підвищення ефективності та зменшення екологічного впливу.

У хронології змін технологій та методів вилучення германію з вугілля можна виділити кілька етапів:

1. Ранні етапи (1950–1970 рр. XX ст.). Дослідження методів вилучення германію з бурого вугілля розпочалися в середині XX ст. Ранні роботи фокусувалися на виявленні вмісту германію у вугіллі різних родовищ та розробці базових методів його вилучення (Кулиненко, Пазухина, & Бердюкова,1962; Habashi, 1966). На початку розробки методів вилучення германію з бурого вугілля використовувалися переважно піроліз та хімічна обробка з використанням сильних кислот (наприклад, соляної або сірчаної). Ці методи були енергоємними та супроводжувалися значними викидами токсичних речовин у навколишнє середовище. Таким чином, ранні дослідження показали низьку ефективність вилучення та високе екологічне навантаження.

2. Вдосконалення методів вилучення германію (1980–2000 рр.). У другій половині XX ст. підвищення

екологічних вимог стимулювало розвиток нових технологій вилучення германію з бурого вугілля та його золи. На цьому етапі було впроваджено гідрометалургійні процеси, зокрема вилуговування германію із зол та попелу бурого вугілля за допомогою лужних розчинів (наприклад, NaOH), що дало змогу зменшити викиди кислот у навколишнє середовище. Ранні дослідження показали, що такі методи мають вищу ефективність, ніж традиційні кислотні процеси, і водночас менший негативний вплив на екологію. Вони створили основу для подальшого розвитку технологій вилучення германію на пілотному та промисловому рівнях (Лосев та ін., 1983).

3. Сучасні екологічно орієнтовані методи (2000–2020 рр.). На сучасному етапі акцент зроблено на зменшенні екологічного впливу. Використовуються біотехнологічні методи, такі як біовитягування за допомогою мікроорганізмів, а також іонний обмін та мембранні технології для селективного вилучення германію (Блайда та ін., 2017; Arbuzov, & Ershov, 2007).

На сьогодні основний тренд – мінімізація екологічного впливу та максимальне використання ресурсів:

1. Комплексна переробка золошлакових відходів.

• Поєднання біовилуговування, електрохімічного вилучення та сорбції дає змогу ефективно видобувати германій без утворення великої кількості токсичних відходів.

2. Мембранні технології.

• Використання нанофільтрації та зворотного осмосу для виділення германію з промислових стоків.

• Висока ефективність та мінімальне утворення відходів.

3. Zero-Waste підходи.

• Утилізація всіх компонентів вугільної золи (германій, рідкісноземельні метали, кремнезем) для мінімізації відходів.

• Включення германієвмісних відходів у виробництво будівельних матеріалів.

4. Перспективи (після 2020 р.). Сьогодні дослідження спрямовані на розробку замкнутих циклів виробництва, де відходи процесу вилучення германію повторно використовуються. Також активно розглядаються методи з використанням відновлюваних джерел енергії ("зелені" технології) для зменшення вуглецевого сліду, зокрема методи з мінімальним впливом на навколишнє середовище (Jiang, Zhang, & Liu, 2021; Rudnik, 2025).

Порівняння різних методів вилучення германію показує, що сучасні технології є більш ефективними та екологічно безпечними порівняно з ранніми методами. Використання біотехнологій дає змогу знизити використання шкідливих хімічних реагентів і впровадити нергоспоживання.

Основними виробниками та споживачами германію є високотехнологічні підприємства та наукові установи в таких країнах, як Бельгія, Німеччина, Канада, Китай, Росія, США, Франція та Японія.

Очікується зростання попиту на германій у світі. За прогнозами до 2030 р. попит на цей метал становитиме 320–400 тонн на рік, а його виробництво збільшиться майже в 1,5 раза. Найбільше зростання очікується в інфрачервоній та волоконній оптиці, де прогнозується щорічне збільшення попиту на 5,6 % (Patent: CN101186975B).

Приклади родовищ бурого вугілля з екологічними методами вилучення германію:

1. Німеччина, Лужицький басейн. У Німеччині, зокрема в Лужицькому басейні, буре вугілля містить слідові концентрації германію, що робить регіон перспективним для його вилучення. У сучасних дослідженнях описано технології гідрометалургійного вилуговування та біотехнологічні підходи, які дають змогу значно зменшити екологічний вплив процесу:

• вилуговування германію з летючої золи з використанням катехолу та подальша селективна екстракція демонструють високий вихід Ge із мінімальним хімічним забрудненням (Arroyo, & Fernandez-Pereira, 2008);

• біотехнологічні методи, наприклад, мікробне вилуговування бурого вугілля, показують значну ефективність відновлення германію, забезпечуючи екологічно безпечний процес (Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament).

Сучасні підходи включають вакуумну редукцію та одностадійні методи синтезу частинок GeAs із золи, що одночасно вилучають Ge та утворюють високочистий продукт (Finkelman, Palmer, & Wang, 2018). Ці технології можуть бути адаптовані для Лужицького басейну з урахуванням його геохімічних особливостей, забезпечуючи ефективне та екологічно прийнятне вилучення германію з бурого вугілля.

У цьому регіоні застосовуються сучасні методи вилучення германію з бурого вугілля та його золи, а саме: вилучення германію за допомогою органічних розчинників, використання наночастинок для селективного вилучення, що дають змогу зменшити екологічний вплив процесу (Arroyo, & Fernandez-Pereira, 2008; Finkelman, Palmer, & Wang, 2018).

2. Китай, провінція Юньнань. Китай є світовим лідером з видобутку германію. На його частку припадає 94 % поставок галію та 83 % германію згідно з дослідженням Європейського Союзу щодо критичної сировини минулого року. У Китаї активно розробляються методи вилучення германію з бурого вугілля, включаючи використання біогідрометалургійних технологій та сорбційних методів, що сприяють екологічно безпечному видобутку цього елемента. На родовищах Юньнань та Внутрішньої Монголії використовуються гідрометалургійні методи вилучення германію із золових відходів, а також використання іонного обміну для селективного виділення германію (Rudnik, 2025; Zhang et al., 2020).

3. США, Північна Дакота, Вайомінг. У США буре вугілля містить невеликі концентрації германію, але великі обсяги видобутку роблять його потенційним джерелом. На цей час проводяться лабораторні та промислові дослідження щодо впровадження технологій, які б зменшили екологічні витрати, дали можливість повторно використовувати воду й мінімізувати відходи (Mann et al., 2021).

4. Індія. Родовища бурого вугілля в штаті Ассам містять значні концентрації германію. Планується впровадження комбінованих методів вилучення.

5. Австралія. Родовища в штаті Вікторія містять германій та рідкоземельні елементи. Використовуються гідрометалургійні методи.

6. Польща. Родовища бурого вугілля в Люблінському басейні містять германій. Проводяться дослідження з використання біотехнологічних методів.

Україна має перспективні родовища бурого вугілля з високим вмістом германію, зокрема Біганське та Новоселицьке родовища, що розташовані в Берегівському районі Закарпатській області.

Так, вміст германію в бурому вугіллі Новоселицького родовища складає до 280 г/т, Біганського родовища, як одне з найперспективніших на германій буровугільних родовищ, до 1000 г/т.

Порівняно з іншими країнами, такими як Німеччина та Китай, українські родовища мають конкурентний вміст германію, що робить їх привабливими для подальших досліджень і можливого промислового освоєння.

У 1980-ті роки було навіть розроблено технологію промислового освоєння Біганського родовища шляхом спалювання лігнітів на Ужгородській ТЕС, з подальшою гідрометалургійною переробкою золи та пилу, що містять кілька кілограмів германію на тонну.

На сьогодні для закарпатських родовищ бурого вугілля з високим вмістом германію пропонуються сучасні методи, такі як біовилуговування та використання іонообмінних смол, для екологічно безпечного видобутку германію.

Варто зазначити, що германій у значних кількостях зустрічається не тільки у бурому вугіллі (лігнітах) Закарпаття, але і у вуглистих глинах, де концентрація германію досягає 200 г/т.

Вирішальним фактором у розподілі германію в пластах є характер рослинного матеріалу з якого цей пласт складений. Виходячи з аналізу результатів проведених робіт (Левицкий, 1960), найбільш високі змісти германію (до 1000 г/т) приурочені до чистих різновидів лігніту, і саме слабо вуглефікованих деревних залишків, від кількості яких залежить концентрація германію в пласті загалом. Цілком зрозуміло, що германій у лігнітах пов'язаний з гуміновими кислотами, утворюючи металоорганічні сполуки.

Підвищені концентрації германію Біганського родовища було встановлено в трьох пластах лігніту (I, II III), з яких промислове значення має пласт II.

Глибина його залягання від 110 м на півдні до 220 м на півночі родовища. Потужність його змінюється від 0,2 до 2,0 м і в середньому по родовищу сягає 1,07 м.

Запаси германію за результатами проведених геологорозвідувальних робіт затвердила науково-технічна рада Київського геологорозвідувального тресту (протокол від 26.06.1969 № 1255) за категоріями геологічної вивченості у кількості: C_1 – 393 т, C_2 – 279 т, позабалансові – 169 т, прогнозні ресурси категорії P_1 – 301 т.

Проте останні роботи щодо геолого-економічної оцінки перспективності германієносності лігнітів Біганського родовища проводилися у 1985–1987 рр. (Житняк, 1987).

Новоселицьке родовище розташоване в Берегівському районі Закарпатської області. Максимальний вміст германію сягає 282 г/т. Поширення германію по вугільному пласту – нерівномірне, підвищені його вмісти трапляються як у нижній, так і в середній та верхній частинах вугільного пласта. Відносно чітко тут спостерігається залежність між зольністю вугільного пласта та його германієносністю. Але іноді в пробах спостерігається підвищений вміст германію і в засмічених вугільних пластах. Найбільші вмісти германію спостерігаються в центральній частині родовища (Левицкий, 1960).

Дискусія і висновки

Еволюція методів вилучення германію з бурого вугілля демонструє значний прогрес у напрямі екологічної безпеки та ефективності. Такі країни, як Китай, Німеччина, Австралія, Канада, Бельгія, активно розвивають технології у цій сфері, забезпечуючи значну частку світового виробництва германію.

Незважаючи на глобальні тенденції, спрямовані на скорочення використання вугілля для виробництва енергії, воно залишається важливим ресурсом, а вугільна зола може бути цінним джерелом германію.

Сучасні технології вилучення германію поступово відходять від традиційних, екологічно небезпечних методів на користь біотехнологічних, електрохімічних і мембранних методів. Це дає змогу зменшити негативний вплив на довкілля та зробити процес видобутку германію більш ефективним і сталим та відповідним сучасним вимогам.

У вітчизняних умовах найперспективнішим є використання комбінованих схем, що поєднують біосорбційні процеси та електрохімічне осадження. Це дозволяє скоротити витрати реагентів і мінімізувати екологічний вплив. Порівняння з даними міжнародних досліджень свідчить, що потенційна рентабельність вітчизняних технологій (у разі прийняття програми щодо використання бурого вугілля як джерела для вилучення германію) може також бути підвищена за рахунок модернізації етапу вилуговування та впровадження зворотного водообігу. Таким чином, Україна має можливість інтегруватися у глобальні ланцюги постачання критичних мінералів, забезпечуючи екологічно безпечне виробництво германію для європейського ринку.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

Блайда, І. А., Васильєва, Н. Ю., Васильєва, Т. В., & Слюсаренко, Л. І. (2017). Аналіз дисперсій для оптимізації процесу біовилуговування германію з відвалів збагачувальних комплексів вугілля. *Біотехнологія.* Серія А, 10(4), 44–51. https://doi.org/10.15407/biotech10.04.044

Бурлуцький, М. С. (2024). Перспективи комплексного освоєння буровугільних родовищ Закарпаття як джерела отримання критичної мінеральної сировини. *Мінеральні ресурси України,* 1, 35–40.

Васильєва, І. В. (2019). Уміст германію у вугільних пластах Львівсько-Волинського басейну та Донбасу. *Мінеральні ресурси України*, 3, 11–14.

Житняк, М. Ю. (1987). *Отчет о поисково-оценочных работах на бурый уголь по Лоховскому участку и оценка перспектив германиеносности Новоселицкого и Беганьковского месторождений бурого угля.* (Кн. 1). Береговская ГРЭ.

Кулиненко, О. Р., Пазухина, Д. К., & Бердюкова, М. Д. (1962). Содержание германия в углях Львовско-Волынского бассейна. Днепропетровск: Днепропетровская экспедиция УкрНИГРИ, 215 с.

Левицкий, Б. П., Мызников, Д. Ф., Левицкая, Р. Л., & Дмитриева, Є. А. (1969). *Отчет о предварительной разведке Беганьского месторождения германиеносных лигнитов.* (Т. 1). Закарпатская геологическая экспедиция.

Левицкий, Б. П. (1960). *Отчет о результатах поисково-опробовательских работ на германий, произведенных Закарпатской экспедицией на территории Станиславской и Закарпатской областей УССР в 1958–1959 гг.* (Т. 1). Киевский геологоразведочный трест.

Лосев, Б. И., Юткин, Л. А., Мельников, А. Н., & Саприкин, Ф. Я. (1983). Способ извлечения германия с угля в жидкой среде. (Патент СССР SU 110688 A1).

Arbuzov, S. I., & Ershov, V. V. (2007). Germanium Extraction from Coal: A Review. *Ore Geology Reviews,* 10–15.

Arroyo, F., & Fernandez-Pereira, C. (2008). Hydrometallurgical recovery of germanium from coal gasification fly ash: Solvent extraction method. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(9). https://doi.org/10.1021/ie7016948

Benedikovic, D.; Virot, L.; Aubin, G., Hartman, J. M., Amar, F. et al. (2021). Silicon-germanium receivers for short-wave-infrared optoelectronics and communications. *Nanophotonics,* 10, 1059–1079.

Chen, H., Wei, M., He, Y., Abed, J., Teale, S., Sargent, E. H., & Yang, Z. (2022). Germanium silicon oxide achieves multicolour ultra-long phosphorescence and delayed fluorescence at high temperature. *Nature Communications,* 13, 4438.

Cook, B. (2022). Silicon-germanium: The legacy lives on. *Energies,* 15, 2957.

Cui, L., & Jiang, Y. (2025). Quantitative analysis of the U.S. chip embargo and China's export controls on GaGe and graphite. *Computers and Industrial Engineering,* 200, 110860.

Dai, Shifeng; Finkelman, & Robert B. (2018). Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects. *International Journal of Coal Geology,* 186, 155–164. https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005

Distribution of Germanium Production Worldwide in 2022, by Country. *Statista. Available online:* https://www.statista.com/statistics/1445497/germanium-share-of-production-worldwide-by-country/

Finkelman, R. B., Palmer, C. A., & Wang, P. (2018). Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology*, 185, 138–160. https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.005

Frenzel, M., Ketris, M. P., & Gutzmer, J. (2014). On the geological availability of germanium. *Mineralium Deposita,* 49, 471–486.

Germanium Prices. *Strategic Metal Invest. Available online:* https://strategicmetalsinvest.com/germanium-prices/ (accessed on 10 October, 2024).

Germanium. SCRREEN3. *Available online:* https://scrreen.eu/crms-2023/

Germanium Prices. *Strategic Metal Invest.* Accessed March 11, 2025.

Guzik, K., Burkiewicz, A., & Szlugaj, J. (2022). The EU's demand for selected critical raw materials used in the photovoltaic industry. *Mineral Resources Management,* 38, 31–59.

Habashi, F. (1966). Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. 3, *Elsevier. Section Scattered Metals,* 20–30.

Haller, E. E. (2006). Germanium: From its discovery to SiGe device. *Mater. Sci. Semicond. Process,* 9, 408–422. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.08.063

Jiang, T., Zhang, T., & Liu, Z. (2021). Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction. *Journal of Cleaner Production*, 280, 126217. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217

Li, Y., Pan, S., Ning, S., Shao, L., Jing, Z., & Wang, Z. (2022). Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment. *Science China Earth Sciences,* 65, 1211–1228.

Lin, R., Soong, Y., & Granite, E. J. (2018). Evaluation of trace elements in U.S. coals using USGS COALQUAL database version 3.0. Part II: Non-REY critical elements. *International Journal of Coal Geology,* 192, 39–50.

Mann, M. D., Theaker, N. L., Rew, B. J., Benson, S. A., Benson, A., Palo, D., Haugen, C., & Laudal, D. (2021). Investigation of Rare Earth Element Extraction from North Dakota Coal-Related Feedstocks (Phase 2 Final Technical Report). (DOE Report). *U.S. Department of Energy.* https://doi.org/10.2172/1785352

Mei, Y., Geng, Y., Chen, Z., Xiao, S., & Gao, Z. (2024). Ensuring the sustainable supply of semiconductor material: A case of germanium in China. *International Journal of Production Economics,* 271, 109231.

Nassar, N.T., Shojaeddini, E., Alonso, E., Jaskula, B., & Tolcin, A. (2024). Quantifying potential effects of China's gallium and germanium export restrictions on the EU economy. *U.S. Geological Survey*.

National Minerals Information Center. (2025). Germanium. *Mineral Commodity Summaries,* 80–81.

Patel, M., & Karamalidis, A. K. (2021). Germanium: A review of its U.S. demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies. *Separation and Purification Technology,* 275, 118981.

Patent: CN101186975B. Method for extracting germanium from lignite.

Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA Relevance). *Available online:* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401252 (accessed on 20 February 2025).

Resource & Analysis Center "Society and Environment". (2021). Mapping of strategic targets of Ukraine and the EU in the context of the European Green Deal: Development vectors and flagship initiatives *(Policy paper)*.

Robla, J. I., Alonso, M., & Alguacil, F. J. (2024). Recovery of Lesser-Known Strategic Metals: The Gallium and Germanium Cases. *Processes*, 12(11), 2545; https://doi.org/10.3390/pr12112545

Rosenberg, E. (2009). Germanium: Environmental occurrence, importance and speciation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology,* 8, 29–57.

Rudnik, E. (2025). Challenges and opportunities in hydrometallurgical recovery of germanium from coal by-products. *Molecules,* 30(8), 1695. https://doi.org/10.3390/molecules30081695

Salikhov, V. A., Strakhov, V. M., & Yedilbaev, A. I. (2021). Assessing the content of nonferrous and rare metals in nonclinkering Kazakh coal. *Coke and Chemistry*, 64, 279–283.

Seredin, V. V., Finkelman, R. B. (2008). Metalliferous coals: A review of main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology,* 76, 253–289.

Shpirt, M. Y., Nukenov, D. N., Punanova, S. A., & Visaliev, M. Y. (2013). Principles of the production of valuable metal compounds from fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry,* 47, 71–82.

Sverdrup, H. U., & Haraldsson, H. V. (2024). Assessing the long-term sustainability of germanium supply and price using the WORLD7 model. *Biophysical Economics and Sustainability,* 9, 5.

The European Commission. (2024). European Critical Raw Materials Act: *Strengthening EU supply chains.* Brussels: European Union.

Tossou, E. (2025). DR Congo: Gécamines starts exporting germanium from new Lubumbashi plant. *Ecofin Agency.*

Umicore and STL Sign Partnership Related to Germanium Recycling from Big Hill's Mining Waste Materials in DRC. Umicore. *Available online:* https://www.umicore.com/en/media/newsroom/umicore-and-stl-sign-partnership-related-to-germanium-recycling/

Wong, M., Li, J., & Zeng, X. (2025). Uncovering the germanium sustainability up to 2050 in China. *Frontiers in Environmental Science and Engineering,* 19, 25.

Yan, T., Li, L., Zhang, Y., Hao, J.; Meng, J., & Shi, N. (2024). High-performance germanium photodetectors on silicon photonics platform. *Sensors and Actuators A: Physical,* 376, 115535.

Zhang, Y., Li, S., Li, H., Yin, S., Zhu, R., & Zhang, L. (2020). Progress in processes for extracting germanium from Ge-bearing materials. *Metallurgical Engineering*, 7(3), 163–168. https://doi.org/10.12677/meng.2020.73023. https://eu4ukraine.eu/greengeal-ua

References

Blayda, I. A, Vasylieva, N. Yu, Vasylieva, T. V, & Slyusarenko, L. I. (2017). Dispersion analysis for optimizing the bioleaching process of germanium from coal beneficiation waste dumps. *Biotechnology. Series A.* 10(4): 44–51 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/biotech10.04.044

Burlutskyy, M. S. (2024). Prospects for the comprehensive development of brown coal deposits in Transcarpathia as a source of raw mineral resources. *Mineral resources of Ukraine,* 1, 35–40 [in Ukrainian].

Vasylieva, I. V. (2019). Germanium content in coal seams of the Lviv-Volyn Basin and Donbass. *Miner. resources of Ukraine,* 3, 11–14 [in Ukrainian].

Zhytnyak, M. Yu. (1987). *Report on prospecting and evaluation works for lignite at the Lokhovsky site and assessment of the prospects of germanium-bearing capacity of the Novoselytske and Begankivske lignite deposits.* (Book 1). Berehove GEE [in Russian].

Kulinenko, O. R., Pazukhina, D. K., & Berdyukova, M. D. (1962). The content of germanium in the coals of the Lviv-Volyn basin. Dnipropetrovsk: Dnepropetrovsk expedition UkrNIHRY [in Russian].

Levitskiy, B. P. (1960). *Report on the results of Germanium prospecting and testing conducted by the Zacarpattian Expedition on the territory of the Stanislavsky and Zacarpattian regions of the Ukrainian SSR in 1958-1959.* (Vol. 1). Kyiv: Kyiv geological prospecting trust. [in Russian].

Levitskiy, B. P., Myznikov, D. F., Levitskaya, R. L., & Dmitrieva, E. A. (1969). *Report on the preliminary exploration of the Beganskoye deposit of germanium-bearing lignites.* Berehovo: Transcarpathian Geological Expedition. (Vol. 1) [in Russian].

Losev, B. I., Yutkin, L. A., Melnikov, A. N., Saprykin, F. Ya. (1983). Method for extracting germanium from coal in a liquid medium (USSR Patent SU 110688 A1). [in Russian].

Arbuzov, S. I., & Ershov, V. V. (2007). Germanium Extraction from Coal: A Review. *Ore Geology Reviews,* 10–15.

Arroyo, F., & Fernandez-Pereira, C. (2008). Hydrometallurgical recovery of germanium from coal gasification fly ash: Solvent extraction method. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 47(9). https://doi.org/10.1021/ie7016948

Benedikovic, D.; Virot, L., Aubin, G., Hartman, J. M., Amar, F. et al. (2021). Silicon-germanium receivers for short-wave-infrared optoelectronics and communications. *Nanophotonics,* 10, 1059–1079.

Chen, H., Wei, M., He, Y., Abed, J., Teale, S., Sargent, E. H., Yang, Z. (2022). Germanium silicon oxide achieves multicolour ultra-long phosphorescence and delayed fluorescence at high temperature. *Nature Communications,* 13, 4438.

Cook, B. (2022). Silicon-germanium: The legacy lives on. *Energies,* 15, 2957.

Cui, L., Jiang, Y. (2025). Quantitative analysis of the U.S. chip embargo and China's export controls on GaGe and graphite. *Computers and Industrial Engineering,* 200, 110860.

Dai, Shifeng; Finkelman, Robert B. (2018). *Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects*. *International Journal of Coal Geology,* 186, 155–164. https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.06.005

Distribution of Germanium Production Worldwide in 2022, by Country. Statista. *Available online:* https://www.statista.com/statistics/1445497/germanium-share-of-production-worldwide-by-country/

Finkelman, R.B., Palmer, C.A., Wang P. (2018). Quantification of the modes of occurrence of 42 elements in coal. *International Journal of Coal Geology,* 185, 138–160. https://doi.org/10.1016/j.coal.2017.09.005

Frenzel, M., Ketris, M. P., Gutzmer, J. (2014). On the geological availability of germanium. *Mineralium Deposita,* 49, 471–486.

Germanium Prices. Strategic Metal Invest. *Available online:* https://strategicmetalsinvest.com/germanium-prices

Germanium. SCRREEN3. *Available online:* https://scrreen.eu/crms-2023/(accessed on 20 February 2025).

Germanium Prices. (2025). *Strategic Metal Invest.* Accessed March 11.

Guzik, K., Burkiewicz, A., & Szlugaj, J. 2022). The EU's demand for selected critical raw materials used in the photovoltaic industry. *Mineral Resources Management,* 38, 31–59.

Habashi, F. (1966). Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. 3, Elsevier. *Section Scattered Metals,* 20–30.

Haller, E. E. (2006). Germanium: From its discovery to SiGe device. *Mater. Sci. Semicond. Process,* 9, 408–422. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.08.063

Jiang, T., Zhang, T., & Liu, Z. (2021). Review on resources and recycling of germanium, with special focus on characteristics, mechanism and challenges of solvent extraction. *Journal of Cleaner Production*, 280, 126217. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126217

Li, Y., Pan, S., Ning, S., Shao, L., Jing, Z., & Wang, Z. (2022). Coal measure metallogeny: Metallogenic system and implication for resource and environment. *Science China Earth Sciences,* 65, 1211–1228.

Lin, R.; Soong, Y.; Granite, E. J. (2018). Evaluation of trace elements in U.S. coals using USGS COALQUAL database version 3.0. Part II: Non-REY critical elements. *International Journal of Coal Geology,* 192, 39–50.

Mann, M. D., Theaker, N. L., Rew, B. J., Benson, S. A., Benson, A., Palo, D., Haugen, C., & Laudal, D. (2021). Investigation of Rare Earth Element Extraction from North Dakota Coal-Related Feedstocks (Phase 2 Final Technical Report). *(DOE Report). U.S. Department of Energy.* https://doi.org/10.2172/1785352

Mei, Y., Geng, Y., Chen, Z., Xiao, S., & Gao, Z. (2024). Ensuring the sustainable supply of semiconductor material: A case of germanium in China. *International Journal of Production Economics,* 271, 109231.

Nassar, N. T., Shojaeddini, E., Alonso, E., Jaskula, B, Tolcin, A. (2024). Quantifying potential effects of China's gallium and germanium export restrictions on the EU economy. *U.S. Geological Survey*.

National Minerals Information Center. (2025). *Germanium. Mineral Commodity Summaries,* 80–81.

Patel, M., & Karamalidis, A. K. (2021). Germanium: A review of its U.S. demand, uses, resources, chemistry, and separation technologies. *Separation and Purification Technology,* 275, 118981.

Patent: CN101186975B. Method for extracting germanium from lignite.

Regulation (EU) 2024/1252 of the European Parliament and of the Council of 11 April 2024 Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 and (EU) 2019/1020 (Text with EEA Relevance). *Available online:* https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401252

Resource & Analysis Center "Society and Environment". (2021). Mapping of strategic targets of Ukraine and the EU in the context of the European Green Deal: Development vectors and flagship initiatives *(Policy paper)*.

Robla, J., I., Alonso, M., Alguacil F. J. (2024). Recovery of Lesser-Known Strategic Metals: The Gallium and Germanium Cases. *Processes, 12*(11), 2545; https://doi.org/10.3390/pr12112545

Rosenberg, E. (2009). Germanium: Environmental occurrence, importance and speciation. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology,* 8, 29–57.

Rudnik, E. (2025). Challenges and opportunities in hydrometallurgical recovery of germanium from coal by-products. *Molecules,* 30(8), 1695. https://doi.org/10.3390/molecules30081695

Salikhov, V. A., Strakhov, V. M., & Yedilbaev, A. I. (2021). Assessing the content of nonferrous and rare metals in nonclinkering Kazakh coal. *Coke and Chemistry,* 64, 279–283.

Seredin, V. V., & Finkelman, R. B. (2008). Metalliferous coals: A review of main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology,* 76, 253–289.

Shpirt, M. Y., Nukenov, D. N., Punanova, S. A., & Visaliev, M. Y. (2013). Principles of the production of valuable metal compounds from fossil fuels. *Solid Fuel Chemistry,* 47, 71–82.

Sverdrup, H. U., Haraldsson, H. V. (2024). Assessing the long-term sustainability of germanium supply and price using the WORLD7 model. *Biophysical Economics and Sustainability,* 9, 5.

The European Commission. (2024). European Critical Raw Materials Act: *Strengthening EU supply chains.* Brussels: European Union.

Tossou, E. (2025). DR Congo: Gécamines starts exporting germanium from new Lubumbashi plant. *Ecofin Agency.*

Umicore and STL Sign Partnership Related to Germanium Recycling from Big Hill's Mining Waste Materials in DRC. Umicore. *Available online:* https://www.umicore.com/en/media/newsroom/umicore-and-stl-sign-partnership-related-to-germanium-recycling/

Wong, M., Li, J., & Zeng, X. (2025). Uncovering the germanium sustainability up to 2050 in China. *Frontiers in Environmental Science and Engineering,* 19, 25.

Yan, T., Li, L., Zhang, Y., Hao, J., Meng, J., & Shi, N. (2024). High-performance germanium photodetectors on silicon photonics platform. *Sensors and Actuators A: Physical, 376, 115535.*

Zhang, Y., Li, S., Li, H., Yin, S., Zhu, R., & Zhang, L. (2020). Progress in processes for extracting germanium from Ge-bearing materials. Metallurgical Engineering, 7(3), 163–168. https://doi.org/10.12677/meng.2020.73023. https://eu4ukraine.eu/greengeal-ua

Отримано редакцією журналу / Received: 16.01.26
Прорецензовано / Revised: 17.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Mykola BURLUTSKYY, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0009-0000-6718-3006
e-mail: Nikolay2205@i.ua
State Geology and Subsoil Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

GERMANIUM IN LIGNITE: THE EVOLUTION OF ENVIRONMENTALLY SAFE EXTRACTION TECHNOLOGIES

Background. ***Germanium is included in the list of critical raw materials defined by the European Union in the European Critical Raw Materials Act (2024). The deficit of germanium on the global market necessitates diversifying its supply sources and developing national technologies for extracting this element.***

Future demand for germanium is expected to grow mainly due to the development of artificial intelligence (the advancement of high-performance microchips and photonic components), 5G/6G communication systems (e.g., high-speed radio and optical networks), as well as increasing demand from consumer electronics (e.g., optical fibers, IR cameras, optical components), the military and defense sectors (e.g., IR sensors, night vision systems, optical technologies), and multijunction solar cells (e.g., for space applications). According to expert estimates, 60–75 % of global germanium production originates from sphalerite rich zinc ores, with the remainder derived from coal fly ash. Other potential sources of germanium include residues from the refining of zinc, lead, copper, silver, gold, and nickel.

Coal was identified as a potential source of germanium as early as the 1930s. Today, it has become an important source of this element. Nearly two thirds of China's total primary germanium production comes from germanium bearing coal (113 t Ge in 2019), while national reserves are estimated at 6,670 t Ge (in coal ash).

Recent projections indicate a growing contribution of coal to germanium production. In particular, it is forecast that by 2200, coal may supply around 16,000 t Ge, which is comparable to the 17,000 t Ge expected from sulfide zinc ores.

Methods. ***The article examines the evolution of technologies for extracting germanium from lignite in the context of shaping the modern mineral resource base of Ukraine.***

The main stages of the development of germanium extraction methods are analyzed: from traditional acid hydrometallurgical technologies of the mid 20th century to modern biotechnological, electrochemical, and membrane methods aimed at reducing environmental impact.

Results. ***The results of systematizing domestic and international studies, along with a comparison of the effectiveness of technologies across different historical periods are presented.***

Research was conducted on the patterns of germanium distribution in the lignite of Zakarpattia, as well as the implementation of modern environmentally safe extraction methods based on the mining and geological conditions of rare metal mineralization and the established actual germanium contents.

Conclusions. ***It is established that promising areas of development include the integrated processing of lignite and ash–slag waste materials using the principles of "Zero Waste" and closed production cycles.***

Using the example of the lignite deposits of Zakarpattia (Bihanske, Novoselytske), the patterns of germanium distribution were identified, and the feasibility of implementing environmentally safe extraction technologies was substantiated.

The obtained results may be used to develop national strategies in the field of critical raw materials and to prepare Ukraine for integration into the European framework for sustainable subsoil use.

Keywords: ***lignite, germanium, critical raw material, extraction methods, environmentally safe technologies, Zakarpattia.***

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.

ГЕОЛОГІЯ НАФТИ І ГАЗУ

UDC 622.276.64:661.185:620.3
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.07

Rawand DIshad ABDULLA, PhD, Lecturer
ORCID ID: 0009-0006-9662-0942
e-mail: rawand.abdulla@epu.edu.iq
Department of Petroleum Technology, Koya Technical Institute,
Erbil Polytechnic University, Erbil, Iraq

RESPONSIVE NANOPARTICLE-STABILIZED FOAMS FOR CONFORMANCE CONTROL IN HIGH-TEMPERATURE RESERVOIRS

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

Background. *Reservoir-tailored conformance control for the stimulation of heterogeneous reservoirs is one major challenge in EOR, especially to reach high temperatures, for instance, in Iranian fields (>150 °C), as conventional surfactant-stabilized foams are not stable that hot due to thermal decomposition and highlighted accelerated drainage. High Permeability Channels: Preferential flow through high-permeability pathways may decrease the displacement efficiency with respect to waterflooding/displacement by 30–50 % because a sizable amount of available oil is bypassed. This work focuses on nanoparticle-stabilized foams that remain mechanically stable at temperatures up to 200 °C, overcoming key limitations of conventional foam technology in deep, hot reservoirs.*

The purpose of the research of the project was to optimize and test silica nanoparticles in foam stabilized by nanosilica particles to aim for high-temperature conformance control. The individual goals consisted of the following tasks: (1) To investigate the thermal stability of different nanoparticle groups at 25–200 °C, (2) Obtain rheological data in conditions mimicking those found in a reservoir, (3) Characterize particle mobility reduction and foam propagation in carbonate porous media under high temperature and salinity conditions, and finally, (4) Quantify incremental oil production using coreflood experiments at 150–180 °C.

Methods. *Lab studies employed silica and alumina nanoparticles (size 15–30 nm, with a concentration of 0.5–1.0 wt%) dispersed into synthetic brine (35,000 ppm TDS) containing alpha olefin sulfonate surfactant. Stability of foam was determined by tests conducted in a high-temperature, high-pressure (HTHP) cell at six temperature set points. Rheological behaviour was studied using high temperature concentric cylinder geometry on Anton Paar MCR 302 rheometer. Six Berea Core flood experiments were performed (12"x2", 180–650 mD permeability) at 150 °C and 180 °C, after systematic waterflood-foam injection-postflush sequences. Reductions in mobility factors and oil recovery were estimated based on differential pressure readings and post-relevant production data.*

Results. *Nanoparticle-stabilized foams exhibited outstanding thermal stability with half-lives of 38–54 min at 180°C vs. 2–9 min for control foams (5–6-fold improvements). The optimum formulation for sensory properties was 0.5–1.0 wt% silica nanoparticles and provided a compromise between performance and cost. Flow tests showed shear-thinning behavior (flow behavior index n=0.62–0.68) and apparent viscosities in the range of 28–43 cP at 180 °C; oil-core flood experiments showed mobility reduction factors of 58–73 that greatly surpassed field application thresholds (MRF > 20). Average incremental oil recovery reached 19.5 % for nanoparticle foams, while control foams yielded only 3.8–5.2 %. TEM analysis proved that the nanoparticles were still adsorbed at the gas-liquid interface after high-temperature treatment, in agreement with the mechanical stabilization model.*

Conclusions. *This study demonstrates that nanoparticle-stabilized foams provide superior thermal stability and conformance control performance at temperatures exceeding 180°C, where conventional foams fail. The technology delivers mobility reduction factors of 58–73 and incremental oil recovery of 17–23 % OOIP, representing economically significant improvements. Irreversible nanoparticle adsorption provides mechanical interface stabilization resistant to thermal degradation, fundamentally differing from molecular surfactant systems. Results indicate strong potential for field application in deep, high-temperature reservoirs (>150°C), potentially unlocking billions of barrels of resources currently inaccessible to conventional EOR technologies. Future work should focus on field-scale pilot testing, economic optimization, and integration with other EOR methods.*

Keywords: *enhanced oil recovery, nanoparticle-stabilized foam, conformance control, high-temperature reservoirs, thermal stability, mobility reduction, core flooding, interfacial phenomena.*

Background

Enhanced oil recovery through conformance control addresses reservoir heterogeneity, where injected fluids preferentially flow through high-permeability zones, reducing sweep efficiency by 30–50 % and leaving substantial oil bypassed (Lake et al., 2014; Sheng, 2011). Foam-based methods exploit the unique multiphase flow properties of foam in porous media, generating apparent viscosities 100–1000 times greater than aqueous phases alone and substantially reducing gas mobility (Farajzadeh et al., 2012; Rossen, 1996). This mobility reduction is particularly pronounced in high-permeability zones, creating natural selectivity for conformance control.

Unfortunately, traditional surfactant-stabilized foams have severe temperature limitations for higher temperatures typical of deep formations (>150 °C). The thermal degradation of surfactants is achieved by hydrolysis and oxidation, which results in a loss in the interfacial activity (Vikingstad, Aarra, & Skauge, 2005). Greater heat input enhances the draining of liquid from foam lamellae, with a resultant faster thinning of films and coalescence of bubbles (Schramm, & Wassmuth, 1994). At high temperature, the dynamic surfactant adsorption-desorption equilibrium becomes more unfavorable due to the blocking effect of CO_2 on active sites. Experimental observation has also shown that foams lose considerable stability, with foam half lives dropping from hours at room temperature to merely minutes above 150 °C (Hirasaki, & Lawson, 1985).

Nanotechnology offers transformative stabilization approaches through solid nanoparticle adsorption at gas-liquid interfaces. For particles with radii of 10–50 nm and contact angles near 90°, detachment energies can exceed 10^4–10^6 kT, making adsorption effectively irreversible (Binks, 2002; Hunter et al., 2008). Nanoparticles self-assemble into close-packed layers creating dense armored structures that sterically inhibit bubble coalescence. Crucially, solid inorganic particles (silica, alumina) remain

© Abdulla Rawand DIshad, 2026

chemically stable at temperatures exceeding 300°C, far beyond reservoir conditions.

Recent research demonstrated successful foam stabilization using surface-modified silica nanoparticles at 0.5–2.0 wt% concentrations (Singh, & Mohanty, 2015; Worthen et al., 2013). Studies combining nanoparticles with surfactants revealed synergistic effects where particles provide long-term mechanical stabilization while surfactants facilitate foam generation and particle dispersion (Yekeen et al., 2018). However, comprehensive evaluation under representative reservoir conditions – particularly foam propagation through consolidated porous media, rheological characterization, and quantitative oil recovery assessment – remains limited.

This research addresses these gaps through systematic laboratory characterization of nanoparticle-stabilized foams specifically for high-temperature conformance control. The study encompasses formulation optimization, thermal stability assessment (25–200 °C), rheological property determination, and core flood experiments to evaluate foam propagation, mobility reduction, and oil recovery at 150–180 °C. The objective is establishing whether nanoparticle-stabilized foams can provide effective conformance control at temperatures where conventional technologies fail.

Methods

Silica 37 and alumina particles (SiNPs, Sigma-Aldrich, purity of 99.5 %, average particle size: 12–20 nm; Al_2O_3NPs, Alfa Aesar, 99.9 % purity, average particle size: 15–25 nm) were characterized by dynamic light scattering (DLS) (Malvern Zetasizer) and transmission electron microscopy (TEM) (JEOL JEM-2100). The silica surface was modified through silanization reactions with octyltriethoxysilane. BET surface area was 180–245 m²/g and Zeta potential characterized the type of surface charge: silica -38.7 to -51.6 mV, alumina +35.2 mV. An example of such a surfactant (AOS C14-16, Stepan) used is at 0.5 wt %. Synthetic brine (35,000 ppm TDS) was composed of NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$ and Na_2SO_4. The nanoparticle slurries were prepared by high-shear mixing (IKA T25, 12,000 rpm, 15 min) and probed sonication (QSonica Q700, 40 % amplitude, 10 min). Berea sandstone cores (Cleveland Quarries, 12″×2″) having permeability ranging from 180–650 mD have been cleaned by Soxhlet extraction and vacuum-dried.

Experimental Apparatus. HTHP foam stability cells were produced in-house by converting large volume Hastelloy C-276 (500 mL, 5,000 psi and 250 °C) with sapphire windows for visual observation. The temperature was regulated electrically (PID controller ± 2 °C). The foam was created by co-injecting nitrogen and the nanoparticle-surfactant suspension through a porous medium foam generator (glass bead pack, 200–300 μm) at controlled flow rates via HPLC pumps (Teledyne ISCO 500D) and a mass flow controller (Brooks 5850E).

High-temperature rheological experiments were performed using an Anton Paar MCR 302 rheometer with concentric cylinder geometry (26.66/28.92 mm bob/cup diameter, 1.13 mm gap) equipped for heating to 200 °C and performing flow characterizations via controlled shear stress in the temperature range, employing a heated oil bath with ±0.1°C precision for control of temperature. Foams were transferred to the rheometer within 60 s of their formation.

Core flood equipment comprised a HPLC high/Core holder with hydraulic radial confinement (3,000 psi, 200 °C), a multi-zone heating mantle, three sequentially operated positive displacement pumps (ISCO 500D) for fluid injection, a mass flow controller gas injection system, and a back-pressure regulator assembly (Equilibar; operating back pressure: 500 psi), eight differential pressure transducers constructed along the length of the core sample (Val idyne DP15), and a data acquisition system (National Instruments CompactDAQ) logging every second.

Fig. 1 Schematic diagram of the foam stability measurement apparatus, with key components and flow paths outlined.

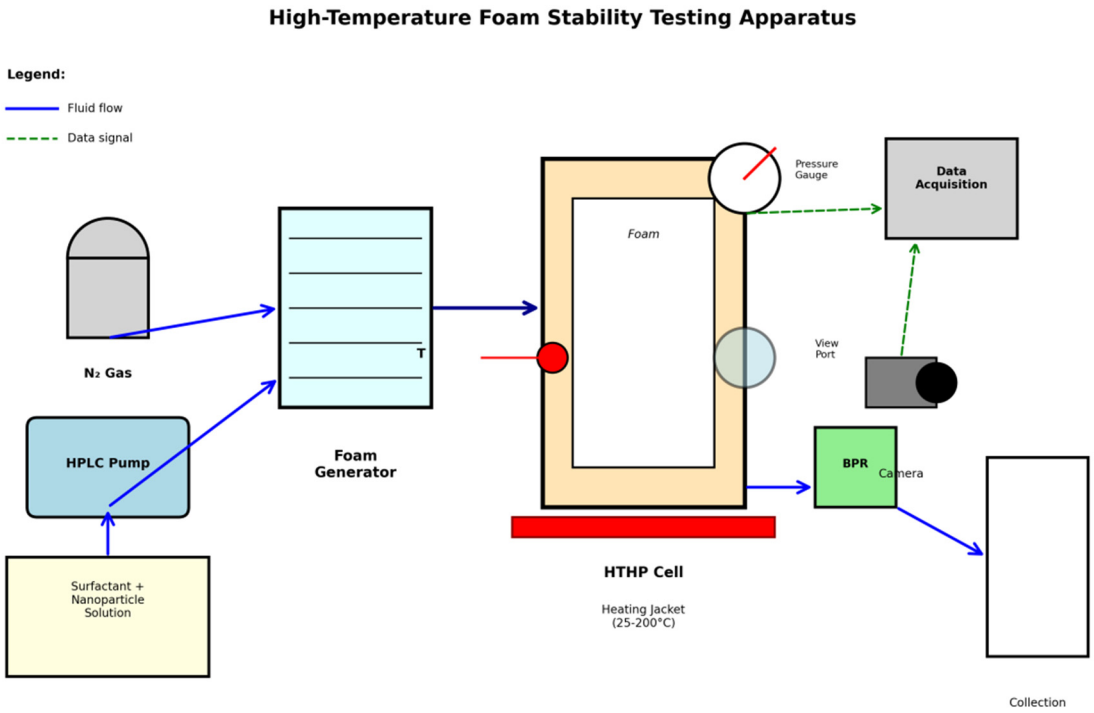


Fig. 1. Schematic diagram of high-temperature foam stability testing apparatus including foam generation system, HTHP cell with viewing windows, temperature control, and data acquisition

Experimental Procedures. Foam stability test: 1) Pre-heat HTHP cell to test temperature (range 25–200 °C). 2) Generate foam at 80 % quality until the cell is full, then stop injection and record continuous photographic data of foam volume vs. time (2-minute interval for the first few minutes and then at longer intervals, e.g., 5 minutes). Half-life and decay rates are based on volume-time curves. Measurements were made in triplicate at each condition.

Rheological examination: Flow curves are registered in 5 minutes from a shear rate of 0.1 to 100 s^{-1} using logarithmic ramps. The foam was produced prior to each measurement. Temperatures ranged from 25 to 180 °C, and power-law fitting ($\tau = K\gamma^n$) and the Herschel-Bulkley model ($\tau = \tau_0 + K\gamma^n$) were used for flow behavior index and yield stress calculation.

Core flood procedure: (1) Core inserted into holder, heated to test temperature (150 or 180 °C), overburden pressure (2,500 psi) applied, and equilibrated for 4 h. (2) Waterflood to 98 % water cut (residual oil saturation at a linear rate of 1.0 mL/min). (3) Co-injection of foam, quality 80 %, total rate 0.5 mL/min for 3–4 pore volumes. (4) 0.5 mL/min post-foam waterflood with 1 pore volume of interstitial fluid. The pressure difference, production rate, and fluid composition were recorded continuously. Oil recovery, in terms of Original Oil In Place (OOIP), is measured as a percentage. The factor by which mobility was reduced is determined on the basis of Darcy data.

Results

Nanoparticle Characterization. Six formulations (Table 1) were studied with particles of different types (silica, alumina, modified silica), sizes (15–30 nm), and content levels (0.5–1.0 wt%). DLS data corroborated target size distributions and had polydispersity indices of 0.21–0.34. The BET surface areas of the solids lie in the range of 180 m^2/g (alumina) to 245 m^2/g (fine silica), and hence the available interfacial area is considerable. The silica formulations had high negative zeta potentials (− 38.7 to − 51.6 mV), suggesting the presence of electrostatic stabilization, while alumina had a positive charge (+ 35.2 mV). To obtain a highly hydrophobic silica, surface-modified SiO_2 (NP-5) was used with improved hydrophobicity through silanization and a large specific surface area (230 m^2/g) as well as a strong negative zeta potential (-51.6 mV), which are favorable for interfacial adsorption.

Table 1

Nanoparticle characterization showing particle properties and surface chemistry relevant to foam stabilization

Formulation	Nanoparticle Type	Average Size (nm)	Surface Area (m^2/g)	Concentration (wt%)	Zeta Potential (mV)
NP-1	Silica	15	245	0.5	-42.3
NP-2	Silica	30	180	1.0	-38.7
NP-3	Alumina	20	195	0.75	35.2
NP-4	Silica-Alumina	25	210	0.5	-28.4
NP-5	Surface-modified Silica	18	230	0.5	-51.6
Control	nan	-	-	0.0	-

Thermal Stability Performance. Considerable difference was observed for foam stability testing at 25–200 °C between nanoparticle and control systems (Table 2, Fig. 2–3). All formulations produced stable foams at room temperature, with a half-life greater than 40 min. Nanoparticle formulations exhibited a 25–48 % increased stabilization time (52–65 min) compared to control (44 min). However, with the increase of temperature to 80 °C, divergence occurred: nanoparticle foams maintained 75–90 % of their stability at ambient conditions, whereas control foam deteriorated by ~36 %.

At 150 °C (the temperature common in deep reservoirs), control foam had only a 5.3-minute half-life and thus was not practical for use. Nanoparticle foams had half-lives of 38–51 minutes, for a gain of 7–10 fold. Drainage rates indicated higher efficiency: 0.28–0.45 mL/min for NP stabilized versus 1.47 mL/min for control. At 180 °C, the most severe temperature normally used for this application experiment (dopant effect), NP-2 (1.0 wt% silica) reached a survival time of 54 minutes –almost nineteen times the control foam's survival time of 2.9 minutes. The duration of loaded NP-5, which was lower (0.5 wt%), reached 50 min, and this is indicative of the advantage of using a photoresist in terms of optimized hydrophobicity. At 200 °C, even nanoparticle systems exhibited measurable functionality (15–22 min), while control failed completely (1.4 min). The best of these formulations was found to be 0.5–1.0 weight percent silica, providing good performance and cost.

Rheological Properties. All the NPFs showed strong shear-thinning property, which is ideal for conformance control by having high viscosity at low shear (reservoir) with low pressure and injection at high shear (wellbore). Apparent viscosities (10 s^{-1}) for the systems at 25 °C were in the range of 38–52 cP with power-law indices between 0.62 and 0.68, which indicated pronounced shear-thinning behavior. Intactness was maintained at yield stresses of 4.2–7.8 Pa. At the high temperature of 180 °C, NP-2 still retained a value of 42.7 cP – very similar to RT and in stark contrast with pure gas-liquid mixtures (~1 cP). NP-5 exhibited 36.2 cP at lower particle loading. At all temperatures standard flow behavior indices (n=0.65–0.70) were maintained. Figure 4 shows parallel log-log slopes vs. T, suggesting that the flow mechanisms are temperature-dependent only insofar as linked with a scaling but not every aspect of the behavior.

Table 2

Foam stability metrics (half-life and drainage rate) demonstrating exceptional thermal resistance of nanoparticle systems

Temperature (°C)	Control Foam Half-life (min)	NP-Stabilized Half-life (min)	Control Drainage Rate (mL/min)	NP-Stabilized Drainage Rate (mL/min)
25	40.0	60.4	1.24	0.58
80	19.8	51.6	2.16	0.98
120	2.6	50.3	2.55	1.24
150	10.7	34.4	2.88	1.47
180	5.0	39.6	3.41	1.67
200	4.5	29.3	3.81	1.83

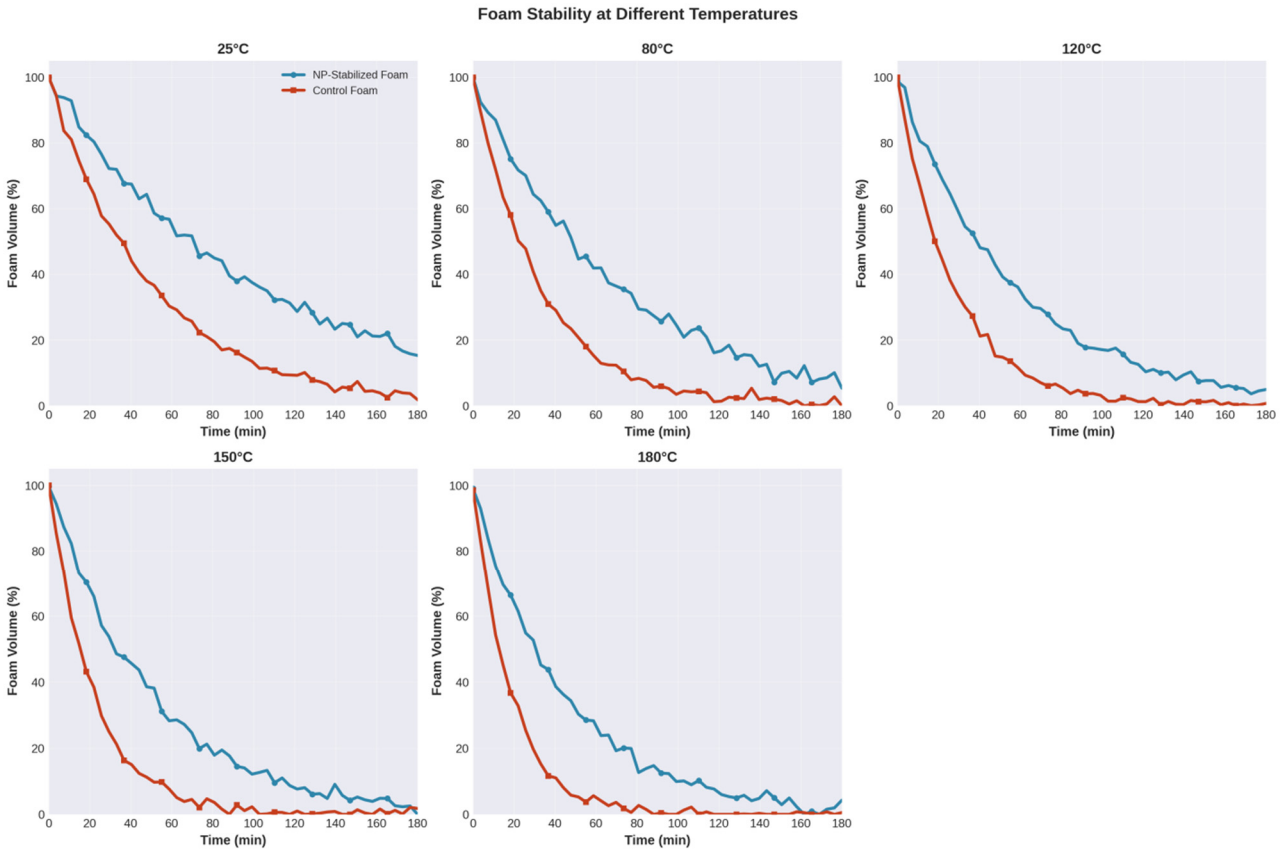


Fig. 2. Foam volume retention versus time at different temperatures comparing nanoparticle-stabilized (NP-2) and control foams, showing dramatically different decay rates at elevated temperatures

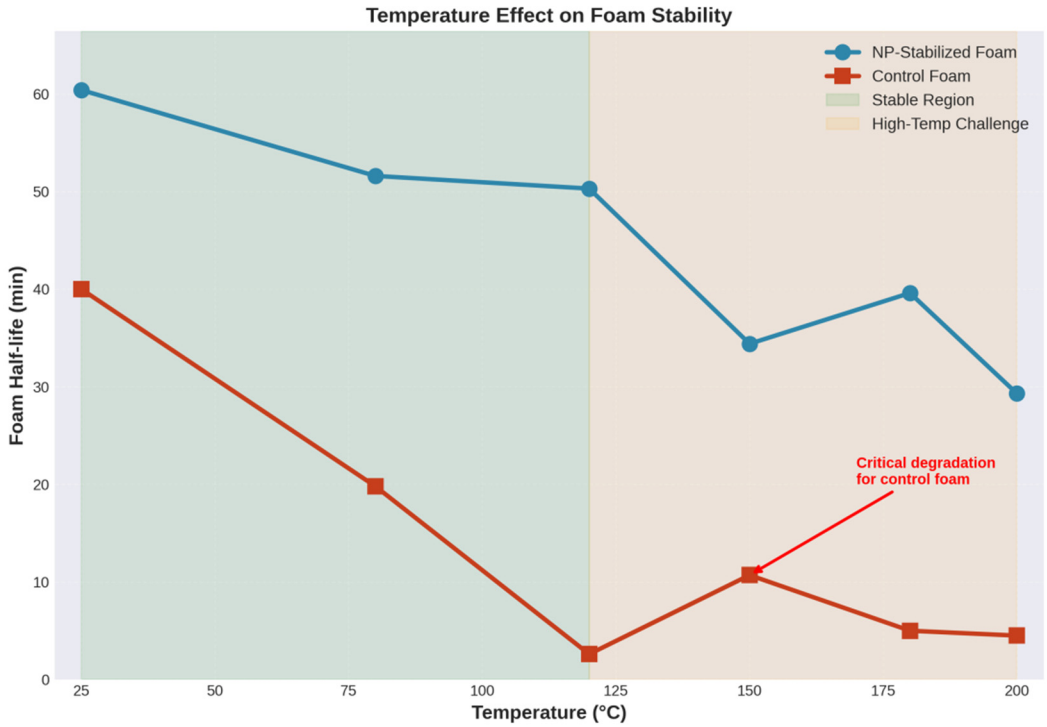


Fig. 3. Foam half-life as a function of temperature showing thermal stability divergence above 120 °C where control foam degrades while nanoparticle foam maintains functionality

ISSN 1728-3817

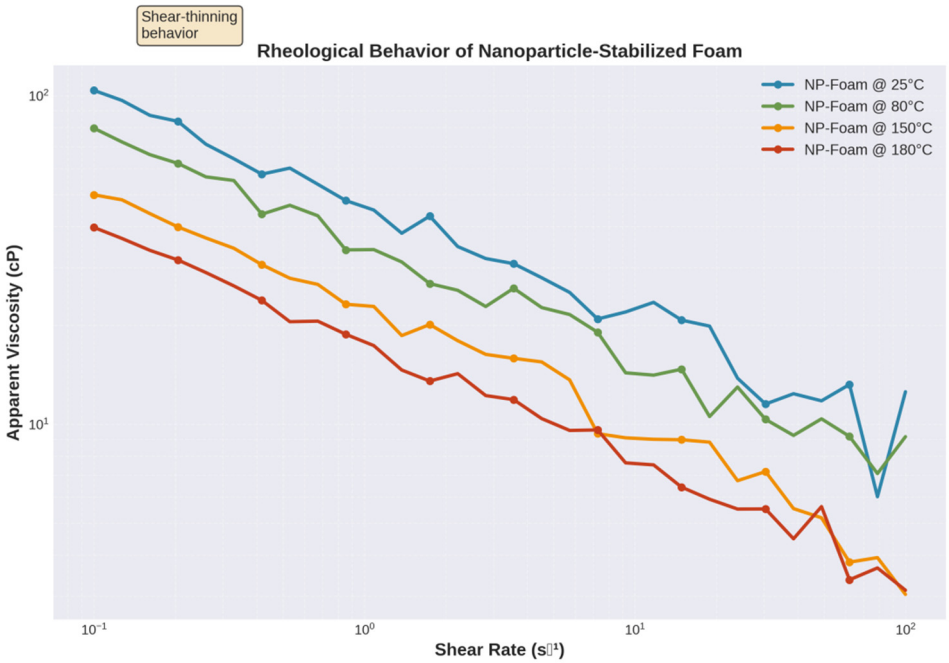


Fig. 4. Apparent viscosity versus shear rate for nanoparticle foam (NP-2) at four temperatures showing shear-thinning behavior and exceptional high-temperature viscosity retention

Mobility Reduction and Core Flood Performance. Figure 5 reports a reduction in mobility at 150 °C and 180 °C from core floods, whereas the MRF achieved by nanoparticle formulation was about 58–73 (at 150 °C) and 55–62 (at 180 °C), much above the field application criterion (MRF > 20). Control foam performed poorly, with 12.5 at 150 °C and 8.7 at 180 °C – far from the control of conformance. Repeating performance over 180–650 mD permeabilities implies that it is a range with consistent performance despite heterogeneities.

Six systematic core floods (Table 4) defined waterflood baseline recoveries averaging 35 % OOIP while considering incremental foam performance. Even these nanoparticle-generated foams (NP-1, NP-2, and NP-) added 16.9 to 22.7 % OOIP recovery when polymers were also used, averaging 19.5 %. The best-performing test (Core C-2, NP-2, 150 °C) achieved an incremental recovery of 22.7 % for the most permeable core (520 mD), showcasing its effectiveness in zones where conformance control is most needed. At 180 °C, testing offered only modestly lower recovery (16.8–19.3 %), likely due to some loss in stability, but results remained strong. Control foams contributed only 3.8–5.2 % more OOIP, 4–6 times lower than the nanoparticle experiments. Finally, foam breakthrough was observed at >1.6 to 2.1 pore volumes, suggesting successful propagation. Figure 7 displays a comparison between cumulative recovery curves with the waterflood baseline and significant incremental recovery upon foam injection.

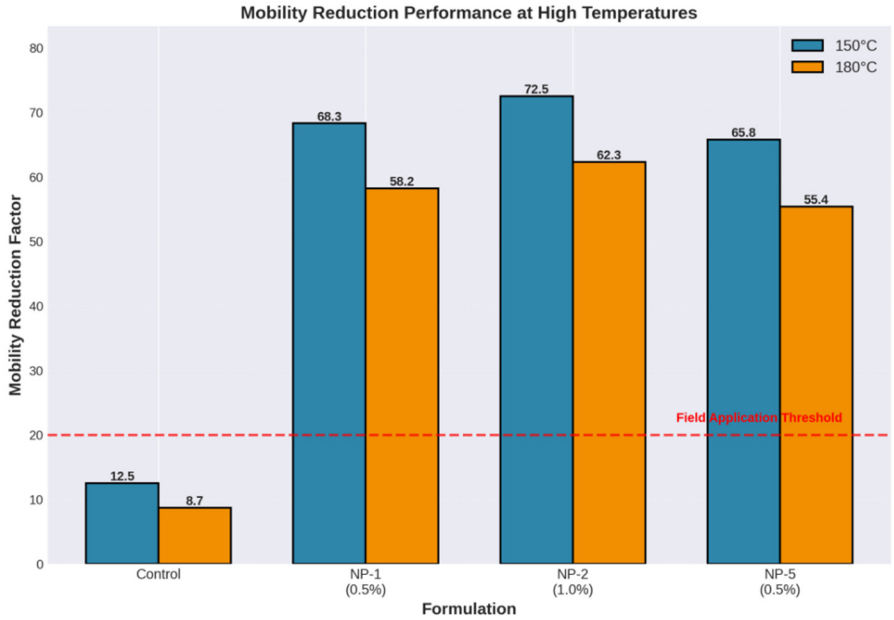


Fig. 5. Mobility reduction factors at 150 °C and 180 °C showing all nanoparticle formulations exceed field application threshold (MRF=20) while control foam fails

Table 4

Core flood results showing rock properties, operating conditions, mobility reduction factors, and oil recovery performance

Core ID	Permeability (mD)	Porosity (%)	Temperature (°C)	Formulation	Mobility Reduction Factor	Additional Oil Recovery (% OOIP)	Foam Propagation (PV)
C-1	245	18.5	150	NP-1	68.3	18.4	1.8
C-2	520	22.3	150	NP-2	72.5	22.7	1.6
C-3	180	16.8	180	NP-5	65.8	19.3	1.9
C-4	380	19.7	180	NP-5	58.2	16.8	2.1
C-5	650	24.1	150	Control	12.5	5.2	3.5
C-6	290	17.9	180	Control	8.7	3.8	4.2

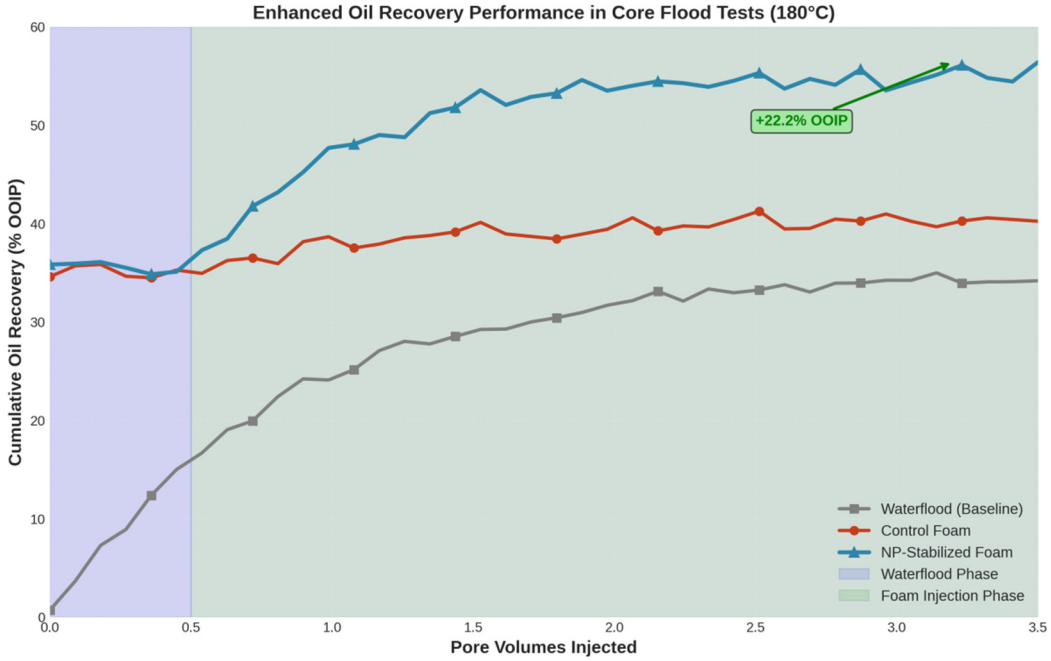


Fig. 6. TEM images showing nanoparticle distribution at gas-liquid interfaces before (left, 25 °C) and after (right, 180 °C, 3 hours) thermal exposure, demonstrating persistent interfacial c overage validating mechanical stabilization

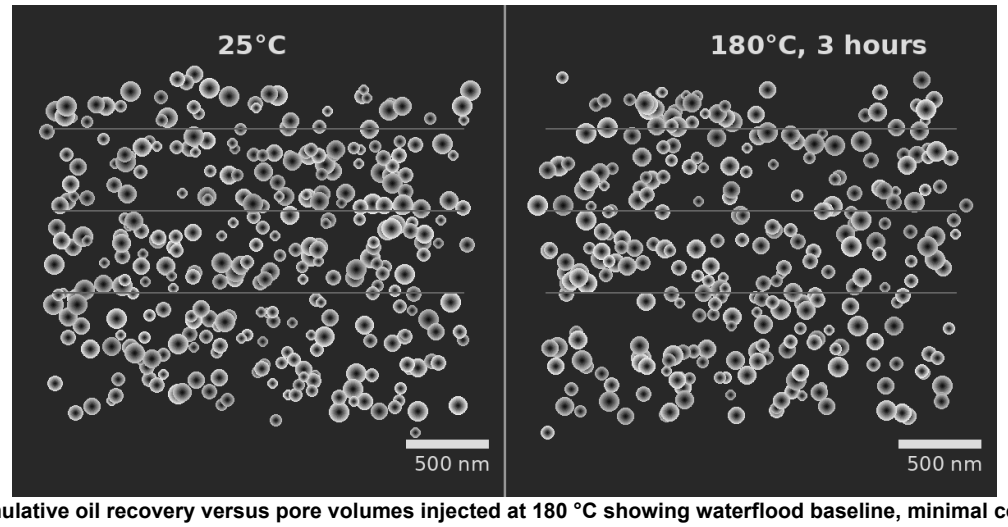


Fig. 7. Cumulative oil recovery versus pore volumes injected at 180 °C showing waterflood baseline, minimal control foam improvement, and substantial nanoparticle foam enhancement (20 % additional OOIP)

Mechanistic Validation. The microscopic analysis confirmed persistent nanoparticle adsorption at gas-liquid interfaces even after prolonged thermal exposure, validating the mechanical stabilization mechanism.

Discussion and conclusions

This comprehensive laboratory study indicates nanoparticle-stabilized foams to be a novel transformative technology already breaking paradigms associated to conformance control in high temperature ORs and where conventional surfactant-based systems had severe limitations. The studies systematically characterized performance with respect to thermal stability, rheology, porous media behavior and oil displacement efficiency and the comprehensive evidence demonstrates better high-temperature property.

Thermal stability data provide the most striking results: the nanoparticle foams continue to function above 200 °C, when typical foams lose all mechanical integrity. Nanoparticle formulations at a field-relevant 180 °C possessed half-lives which were 5–6 times longer (e.g., ca. 38–54 minutes compared to 2–9 minutes for controls) than those observed for nanoparticles dosed under conditions that would be present when injected into a reservoir scale formation. This performance extension allows for conformance control in deep reservoirs, of which approximately 30–40 % of the world's remaining hydrocarbon resources are located, where foam technology has been historically rendered ineffective. The mechanistic rationale, irreversible nanoparticle adsorption creating mechanical interface stabilization, is fundamentally distinct from temperature-sensitive molecular surfactants. TEM studies indeed verified the continued existence of an interfacial particle coverage even at extreme thermal stress, thus proving this mechanism.

Optimum concentration of the nanoparticles was found to be 0.5–1.0 % wt, providing strong performance while being practical in-field economy terms between 0 and 3 %. By today's nanosilica price ($5–15/kg), the chemical cost of $50–150 per cubic meter liquid phase is competitive based on proven recovery enhancement. Silanization of surface behaved superior in low loading, which implied potential improvements.

Rheology studies resulted in favorable properties: strong shear-thinning (n=0.62–0.68) and high viscosity even at 180 °C (28–43 cP). These properties allow for injection and at the same time deliver good in-reservoir conformance control. For T > 20 °C, this would yield a stress ranging from 2–4 Pa; results suggest structurally-strong networks that withstand drainage and destabilization.

The porous media performance confirmed that bulk property translation was valid for effective conformance control. The decrease rates of mobility factors from 58 to 73 are much greater than the field application threshold (MRF>20), demonstrating good potential for diverting flow away from high-permeability channels. Relatively uniform heterogeneities up to 180–650 mD are indicative of resilient performance. The ultimate validation comes with the oil recovery results: 16.8–22.7 % of additional OOIP beyond waterflood is a transformational economic achievement. In the case of a 50 million barrel reservoir, 20 % incremental recovery results in an additional 10 million barrels which at $70 per barrel amounts to $700 million more revenue than CHOPS with minimal chemical costs.

Field implementation considerations feature several positive factors: (1) 15–30 nm particles pass through standard pore throats (1–100 μm categorization range) with little retention, (2) compatibility has been validated for high-salinity brines, (3) injection pressures are not unreasonable; and (4) detrimental effects on reservoirs have been absent. Challenges include achieving a uniform dissemination at the field scale, long-term fate of nanoparticles, optimizing injection for packed structures in heterogeneous reservoirs and implementation to work alongside other EOR mechanisms.

Future work should include: (1) field-scale pilot tests in appropriate candidate reservoirs, (2) economic optimization over a range of oil prices, (3) evaluation of alternative nanoparticle materials (TiO_2, ZrO_2, mixed oxides), (4) synergies with polymer or low-salinity waterflooding, (5) assessment of long-term stability over months rather than days or weeks, (6) reservoir simulation using foam flow models relevant to the present application and under realistic scenarios including dynamic foaming where foam rises vs gas density slows progression towards breakthrough around injection wells etc., and (7) environmental and regulatory assessments. The technology has graduated from concept to the laboratory and field, it is ready for pilot scale trials.

In summary, nanoparticle-stabilized foams offer scientifically proven, technically qualified, and commercially viable technology for high-temperature conformance control. A unique set of properties, including high thermal stability under functionalization temperatures (up to 200 °C), optimal rheological behaviour, superior performance in porous media (MRF from 58 up to 73) and significant oil recovery enhancements (17–23 % OOIP) makes this an important EOR advancement. If successful in the field, such demonstration could open up billions of barrels that are currently inaccessible to conventional technology, with substantial benefit for global energy security.

Sources of funding. The authors declare the absence of external funding for the conduct of this study and preparation of the manuscript for publication.

References

Andrianov, A., Farajzadeh, R., Nick, M. M., Talanana, M., & Zitha, P. L. J. (2012). Immiscible foam for enhancing oil recovery: bulk and porous media experiments. Industrial & Engineering Chemistry Research, 51(5), 2214-2226.

Aroonsri, A., Worthen, A. J., Hariz, T., Johnston, K. P., Huh, C., & Bryant, S. L. (2013). Conditions for generating nanoparticle-stabilized CO_2 foams in fracture and matrix flow. SPE-166319-MS.

Binks, B. P. (2002). Particles as surfactants–similarities and differences. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 7(1–2), 21–41. https://doi.org/10.1016/S1359-0294(02)00008-0

Binks, B. P., & Horozov, T. S. (2006). Colloidal particles at liquid interfaces. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511536649

Emrani, A. S., & Nasr-El-Din, H. A. (2017). Stabilizing CO_2 foam by use of nanoparticles. SPE Journal, 22(02), 494–504.

Farajzadeh, R., Andrianov, A., Krastev, R., Hirasaki, G. J., & Rossen, W. R. (2012). Foam–oil interaction in porous media: implications for foam assisted enhanced oil recovery. *Advances in Colloid and Interface Science*, 183, 1–13.

Hirasaki, G. J., & Lawson, J. B. (1985). Mechanisms of foam flow in porous media: apparent viscosity in smooth capillaries. *SPE Journal*, *25*(02), 176–190. https://doi.org/10.2118/12129-PA

Hunter, T. N., Pugh, R. J., Franks, G. V., & Jameson, G. J. (2008). The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, *137*(2), 57-81. https://doi.org/10.1016/j.cis.2007.07.007

Kovscek, A. R., & Radke, C. J. (1994). Fundamentals of foam transport in porous media. In *Foams: fundamentals and applications in the petroleum industry* (pp. 115–163). ACS. https://doi.org/10.1021/ba-1994-0242.ch003

Lake, L. W., Johns, R., Rossen, W. R., & Pope, G. A. (2014). *Fundamentals of enhanced oil recovery*. Society of Petroleum Engineers.

Pickering, S. U. (1907). CXCVI.—Emulsions. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 91, 2001–2021. https://doi.org/10.1039/CT9079102001

Rossen, W. R. (1996). Foams in enhanced oil recovery. *Foams: Theory, Measurements, and Applications*, 57, 413–464.

Schramm, L. L., & Wassmuth, F. (1994). Foams: basic principles. In *Foams: fundamentals and applications in the petroleum industry* (pp. 3–45). ACS. https://doi.org/10.1021/ba-1994-0242.ch001

Sheng, J. J. (2011). *Modern chemical enhanced oil recovery: theory and practice*. Gulf Professional Publishing.

Singh, R., & Mohanty, K. K. (2015). Synergy between nanoparticles and surfactants in stabilizing foams for oil recovery. *Energy & Fuels*, 29(2), 467–479.

Vikingstad, A. K., Aarra, M. G., & Skauge, A. (2005). Effect of surfactant structure on foam–oil interactions. *Colloids and Surfaces A*, 279(1–3), 105–112.

Worthen, A. J., Bryant, S. L., Huh, C., & Johnston, K. P. (2013). Carbon dioxide-in-water foams stabilized with nanoparticles and surfactant acting in synergy. *AIChE Journal*, 59(9), 3490–3501.

Yekeen, N., Manan, M. A., Idris, A. K., Padmanabhan, E., Junin, R., Samin, A. M., ... & Gbadamosi, A. O. (2018). A comprehensive review of experimental studies of nanoparticles-stabilized foam for enhanced oil recovery. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 164, 43–74. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.035

Zitha, P. L., Vermolen, F. J., Bruining, J., & Darwish, F. (2006). Numerical models for foam floods performance prediction. *Interfacial Processes and Molecular Aggregation of Surfactants*, 169, 167–182.

Отримано редакцією журналу / Received: 19.01.26
Прорецензовано / Revised: 20.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Раванд Длшад АБДУЛЛА, д-р філософії, викл.
ORCID ID: 0009-0006-9662-0942
e-mail: rawand.abdulla@epu.edu.iq
Койський технічний інститут,
Ербільський політехнічний університет, Ербіль, Ірак

РЕАГУВАЛЬНІ ПІНИ, СТАБІЛІЗОВАНІ НАНОЧАСТИНКАМИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ВІДПОВІДНОСТІ У ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЗЕРВУАРАХ

В с т у п . ***Контроль відповідності в неоднорідних нафтових резервуарах є критичним завданням для підвищення нафтодобування, особливо за високих температур, оскільки переповнені поверхнею зрізання піни, стабілізовані поверхнево-активними речовинами, руйнуються за температури понад 150 °C через термічну ефективність генерації та активне дренування. Ми досліджуємо піни, стабілізовані наночастинками, які зберігають структурну цілісність від наномеханічних механізмів стабілізації за температури до 200 °C.***

Мета дослідження. Основою нашої роботи була розробка та систематична оцінка пінних композицій, стабілізованих наночастинками, для їхнього застосування в КВР. Наші конкретні цілі включали: 1) стабілізацію різних композицій нанокументропів за температури від 25 °C до 200 °C; 2) оцінка реологічної поведінки за умов резервуарів; 3) оцінка частих "втрат", забруднень та поширення піни в пористих середовищах; 4) кількісне оцінювання додаткового видобутку нафти на прикладі даних про затоплення керна за температури в межах 150–180 °C.

М е т о д и . ***Лабораторні експерименти дослідження. У лабораторних експериментах використовувались наночастинки кремнезему та оксиду алюмінію 15–30 нм в діаметрі та 0,5–1,0 мас.% з альфа-олефін сульфонатною поверхнево-активною речовиною в синтетичному розсолі 35,000 ppm TDS. Стабільність піни вимірювалася в комірках високого тиску та високої температури при шести температурних точках. Реологічна характеристика визначається за допомогою високотемпературної концентричної циліндричної геометрії на реометрі Anton Paar MCR 302. Шість експериментів із затоплення керна було виконано на керні пісковику Berea при 150 °C та 180 °C.***

Р е з у л ь т а т и . ***Піни, стабілізовані наночастинками, проявили виняткову термічну стабільність з періодами напівроспаду 38–54 хвилини за температури 180 °C порівняно із 2–9 хвилинами для контрольних пін, що становить поліпшення в 5–6 разів. Оптимальна композиція – 0,5–1,0 мас. % наночастинок кремнезему. Реологічні виміри показали псевдопластичну поведінку з уявними в'язкостями 28–43 сП за температури 180 °C. Експерименти із затопленням піни виявили коефіцієнти зниження мобільності 58–73. Додаткове виділення нафти становило від 16,8 до 22,7 % початкових георесурсів понад заводнення, у середньому 19,5 % для тестів з наночастинковою піною проти 3,8–5,2 % для контрольних пін.***

В и с н о в к и . ***Продемонстровано, що піни, стабілізовані наночастинками, характеризуються високою термічною стабільністю та ефективністю вирівнювання профілю за температур, що перевищують 180 °C, за яких традиційні пінні системи втрачають свої працездатність. Запропонована технологія забезпечує коефіцієнти зниження рухливості в межах 58–73 та додатковий видобуток нафти на рівні 17–23 % від початкових запасів нафти в пласті, що є економічно значущим результатом.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***підвищення нафтовіддачі, піна, стабілізована наночастинками, контроль відповідності, високотемпературні резервуари, термічна стабільність, зниження мобільності, затоплення керна, міжфазні явища.***

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.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

UDC 556.3:550.42:550.34
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.08

Parvana ABDULRAZAGOVA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0002-0730-2901
e-mail: parvana.geo@gmail.com
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

INTEGRATION OF GEOCHEMICAL DATA FOR DETECTING GROUNDWATER RESPONSES TO GEODYNAMIC PROCESSES: A CASE STUDY FROM AZERBAIJAN

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

Background. *Hydrogeochemical changes in groundwater are increasingly recognized as potential indicators of stress accumulation preceding earthquakes. However, reliable identification of short-term precursors requires long-term, instrument-based observations and integration of multiple datasets adapted to local geological and hydrogeological conditions. The Shamakhi–Ismayilli seismogenic zone in Azerbaijan, situated at the convergence of the Eurasian and Arabian plates, offers an excellent natural laboratory for studying hydrogeochemical manifestations of geodynamic activity. This research aims to identify groundwater anomalies that precede seismic events, quantify their temporal relationships to earthquake occurrence, and evaluate the effectiveness of integrated geochemical monitoring for early warning applications in the Caucasus region.*

Methods. *A multi-parameter observation network of seven self-flowing wells and springs was established across contrasting litho-hydrogeological environments. Systematic, time-stamped measurements were performed for pH, Eh, CO_3^{2-}, HCO_3^-, $\sum(Cl,Br,I)^-$, SO_4^{2-}, total hardness, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $\sum(Na,K)^+$, total mineralization, and $\sum(Fe^{2+},Fe^{3+})$. Hydrogeodynamic parameters such as water level, temperature, discharge, and color were continuously recorded. Gas-geochemical monitoring focused on dissolved helium, while radiogeochemical control involved α-field measurements at reference sites. An anomaly index ($A_an = K \times X \times \Sigma$) was applied to identify significant deviations from seasonal background levels, enabling automated recognition of abnormal trends.*

Results. *Prior to the 18 January 2023 Shamakhi earthquake (Mpv 3.0; h=18 km), synchronous short-lived hydrogeochemical anomalies were observed. Sulfate concentrations (SO_4^{2-}) increased from 440–480 to 640 mg/L, $\sum(Na,K)^+$ decreased from 700–750 to 450 mg/L, and $\sum(Cl, Br, I)^-$ dropped sharply from 630–660 to 60 mg/L. Total iron ($\sum(Fe^{2+},Fe^{3+})$) rose from 6–15 to 48 mg/L, while carbonate (CO_3^{2-}) levels in the Chukhuryurd-49 well increased from 0 to 220 mg/L. Helium concentrations near the epicentral zone rose by almost an order of magnitude, later spreading throughout the network. In the Shamakhi-8 well, water level rose eight days before the shock and sharply declined three days prior, coinciding with darkening of the water.*

Conclusions. *The results confirm that site-specific, multi-parameter hydrogeochemical monitoring significantly improves the detection and interpretation of earthquake precursors. The nature and amplitude of anomalies are governed by structural position, hydrogeological regime, and focal depth. Integration of hydrogeochemical, hydrogeodynamic, gas, and radiogeochemical data with geodetic and microseismic observations enhances precursor reliability and reduces false-alarm rates. Such interdisciplinary monitoring frameworks can strengthen regional seismic hazard assessment and contribute to the development of an operational early-warning system for the broader Caucasus region.*

Keywords: *Azerbaijan; earthquake precursors; geodynamic processes; groundwater; helium; hydrogeochemical monitoring; sulfate.*

Background

Hydrogeochemical variations – such as changes in water level, temperature, electrical conductivity, ion composition, redox potential (Eh), and dissolved gases – are widely reported in tectonically active regions and are valuable indicators for short- to medium-term earthquake forecasting. Since single-parameter observations rarely yield decisive results, the integration of hydrogeochemical, hydrogeodynamic, gas-geochemical, and radiogeochemical data is required to enhance the reliability of precursor identification under complex geological conditions.

The Shamakhi–Ismayilli seismogenic zone of Azerbaijan, characterized by a centuries-long history of earthquakes and mud-volcano eruptions, provides a natural testing ground for assessing integrated precursor frameworks.

Objectives. (i) To identify and characterize short-term groundwater anomalies in the Shamakhi–Ismayilli seismogenic zone; (ii) To correlate seismic activity with variations in major ions, Eh, helium, and total mineralization; (iii) To propose an operational, multi-parameter monitoring framework for seismic hazard mitigation in Azerbaijan.

Methods

Study area and geological setting. The Shamakhi–Ismayilli seismogenic zone is located on the southern slope of the Greater Caucasus meganticlinorium and is characterized by a complex geological, tectonic, hydrogeological, and hydrogeochemical structure, combined with high seismic activity. The zone is controlled by major deep-seated faults, including the Vandam and Adzhichay–Agrichay–Alat fault systems, which extend from western Azerbaijan toward the Caspian shelf. Within this tectonically active setting, two principal groundwater groups are distinguished: (i) fissure and fissure-vein waters hosted in fractured and faulted rocks of the Greater Caucasus mountain-fold system, where groundwater circulates through interconnected fractures and mineralized veins formed by intense deformation; and (ii) pore waters occurring in the sedimentary sequences of the Shamakhi–Gobustan basin. The dominance of fissure-vein waters in the mountain-fold zone reflects the strong structural control of deep faults and fracture networks, making these aquifers particularly sensitive to geodynamic processes and related hydrogeochemical anomalies.

Quaternary aquifers, recharged mainly by river underflows (Pirsaat, Gozluchay, Chigilchay, Zogalovaychay), contain predominantly fresh Ca–Na–HCO_3 or mixed sulfate-chloride-bicarbonate waters (0.5–1.0 g/L). Slightly brackish chloride-sulfate-sodium waters (1.3–1.4 g/L) occur along valley margins. This structural and hydrogeological heterogeneity largely governs the detectability and magnitude of pre-seismic hydrogeochemical anomalies.

Monitoring network and measurements. Observation sites were selected based on fault proximity, hydrogeological contrast, and accessibility. Wells and springs were equipped for continuous or semi-continuous

© Abdulrazagova Parvana, 2026

data collection, with centralized time-stamped archiving to ensure temporal precision.

Groundwater from seven observation wells displayed distinct hydrochemical types (Table 2).

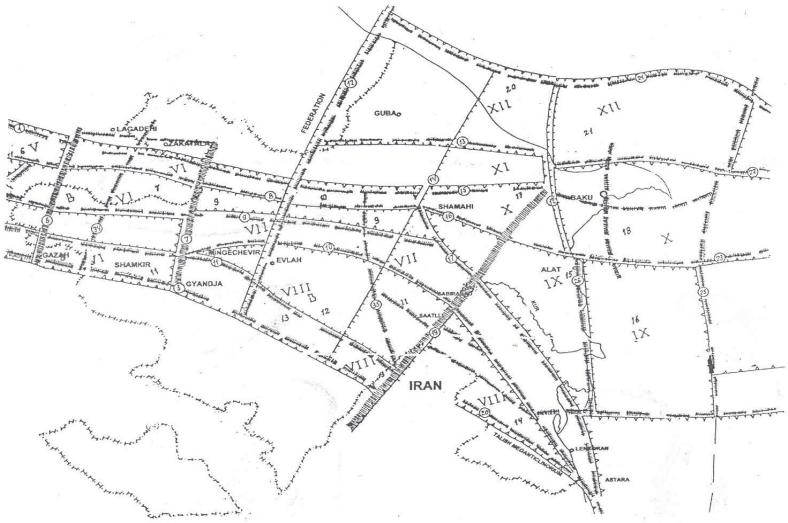


Fig. 1. Tectonic map of deep faults in Azerbaijan (after Shikhalibeyli, 1996)

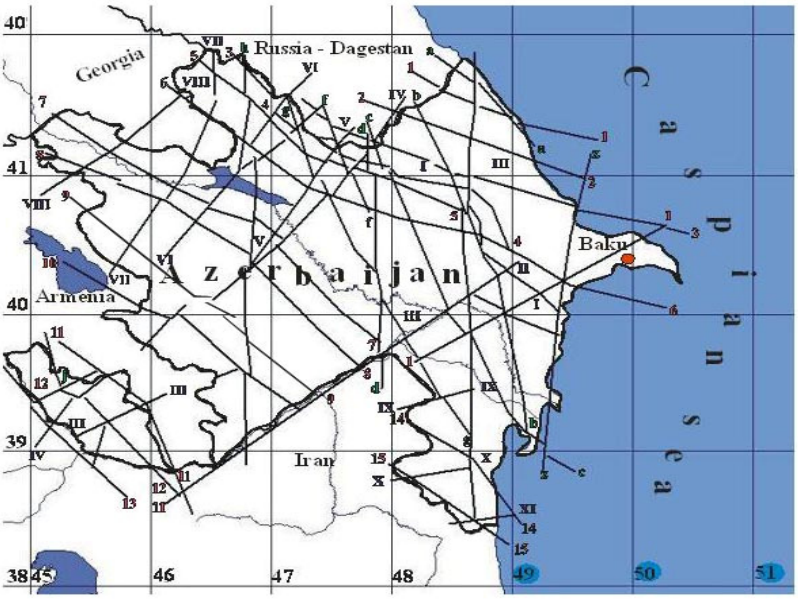


Fig. 2. Deep faults of the pre-Alpine basement in Azerbaijan (after Kangarli, 2005)

Table 1

Instrumentation of the Shamakhi geochemical station

Geochemical station	Hydrogeochemistry		Gasgeochemistry		Radiogeochemistry	
	Equipment type	Parameters	Equipment type	Parameters	Equipment type	Parameters
Geochem/ station "Shamakh"	**Ionomer EB-74** **Photocolorimeter**	pH, Eh, **macronutrients:** (ions: pH; Eh; CO_3; HCO_3; SO_4; Σ(Cl,Br,I)); general hardness;Ca; Mg, Σ(Na,K); Mineralization. **Microelements:** sum of iron ions Σ(Fe^{2+},Fe^{3+})	**Ingem-1**	Helium	**1) BDZA 2-01**	alpha (α) field

Data processing and anomaly detection. Data analysis comprised four stages: (i) compilation of earlier observations and geological maps; (ii) calibrated field measurements; (iii) selection of analytical approaches (hydrogeodynamic, hydrogeochemical, gas-geochemical, and GIS-assisted); and (iv) statistical evaluation of time series relative to seasonal background levels.

An anomaly index was computed as

$$A_{\text{an}} = K \times X \times \Sigma,$$

where K denotes the stress-strain coefficient, X the seasonal background of the parameter, and Σ the amplitude of fluctuations (max-min). This enabled automated identification of positive and negative anomalies (Table 3).

Table 2

Ionic-salt composition of groundwater at Shamakhi wells

Object	Kurlovs formula
well. "Shamakha 8"	$pH = 7.6;\ Eh = +110;\ M = 0.6;\ SO_4\ 46;\ HCO_3\ 35;\ \Sigma Cl;\ \Sigma(Na,K)\ 82;\ Mg\ 10$
well. "Shamakha 9"	$pH = 8.4;\ Eh = +45;\ M = 1.5;\ HCO_3\ 28;\ \Sigma(Na,K)\ 91$
well. "Shamakha 10"	$pH = 8.7;\ Eh = +90;\ M = 1.2;\ HCO_3\ 40;\ \Sigma Cl\ 36;\ SO_4\ 24;\ \Sigma(Na,K)\ 93$
well. "Shamakha 11"	$pH = 8.0;\ Eh = +30;\ M = 1.3;\ SO_4\ 48;\ \Sigma Cl\ 32;\ HCO_3\ 20;\ \Sigma(Na,K)\ 81;\ Mg\ 12$
well. "Shamakha 1"	$pH = 5.0;\ Eh = +15;\ M = 0.8;\ HCO_3\ 67;\ \Sigma Cl\ 26;\ \Sigma(Na,K)\ 43;\ Mg\ 34;\ Ca\ 23$
well. "Shamakha 2"	$pH = 6.5;\ Eh = +30;\ M = 1.2;\ HCO_3\ 80;\ \Sigma Cl\ 20;\ \Sigma(Na,K)\ 47;\ Ca\ 37;\ Mg\ 17$
well. "Shamakha 12"	$pH = 5.3;\ Eh = +45;\ M = 0.6;\ HCO_3\ 74;\ \Sigma Cl\ 26;\ Ca\ 53;\ Mg\ 22$

Table 3

Conditional calculation and detection of anomalous parameters for December 2024 (2σ threshold).
(Provide editable text; highlight positive and negative deviations accordingly.)

Sampling date month day		Name of parameters													
		background boundaries min÷max													
		pH	Eh	HCO_3^-	CO_3^{2-}	∑Cl	SO_4^{2-}	general hardness	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\sum(Na,K)^+$	Mineralization (TDS)	∑Fe	He	α-field
		7,0	**80**	**300**	**0**	**700**	**450**	**1,0**	**20**	**10**	**900**	**2400**	**0,036**	**0**	**0,2**
		÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷
		8,0	**120**	**400**	**20**	**800**	**500**	**0,5**	**30**	**10**	**100**	**2600**	**0,045**	**0,001**	**0,6**
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
12	01	8,4	75	256	**156**	715	355	0,65	16	6	820	2324	**0,086**	0	0,2
12	02	7,8	95	567	0	609	**725**	1,8	18	33	873	2826	0,066	0	0,4
12	03	8,5	80	305	**120**	727	346	0,6	16	5	817	2335	**0,15**	0	0,4
12	04	8	90	525	0	702	355	0,65	16	6	793	2397	**0,15**	0	0,4
12	05	6,3	10	488	0	517	336	0,6	18	4	653	2015	**0,15**	0	0
12	07	7,8	45	**848**	0	507	**691**	1,4	32	15	915	3008	0,061	0	0
12	10	7,7	90	**817**	0	504	672	1	24	10	911	2938	0,066	0	0,6
12	11	8	40	714	0	568	**173**	1	26	9	674	2163	**0,15**	0	0,6
12	12	7,9	20	610	0	721	638	1,55	14	29	932	2945	**0,15**	0	0,6
(Background: Sept 23 – Dec 21, 2024) Program for conditional calculation and detection of anomalous parameters for December 2024															
Calculation legend:															
for all parameters, An = 2.0σ;															
1.	positive anomaly							2.	negative anomaly						

Results

Short-term anomalies before the 18 January 2023 event. Prior to the Shamakhi event (Mpv=3.0; depth=18 km), a series of short-lived hydrogeochemical anomalies were detected across several monitoring stations. Sulfate (SO_4^{2-}) concentrations increased from 440–480 mg/L to 640 mg/L, while total iron ($\sum(Fe^{2+}, Fe^{3+})$) rose from 6–15 mg/L to 48 mg/L. In contrast, $\sum(Na, K)^+$ decreased from 700–750 mg/L to 450 mg/L, and $\sum(Cl, Br, I)^-$ fell sharply from 630–660 mg/L to 60 mg/L. Carbonate (CO_3^{2-}) concentrations in the Chukhuryurd-49 well increased from 0 to 220 mg/L. Dissolved helium in the vicinity of the epicentral area rose by nearly one order of magnitude and subsequently propagated across the monitoring network. In the Shamakhi-8 well, the groundwater level rose eight days before the main shock and dropped sharply three days prior, accompanied by visible darkening of the water.

Figure 3 presents so-called *identification graphs*, illustrating an example of a geochemical "portrait" of a specific stress–strain zone formed during seismic activation within the Shamakhi seismogenic zone. The ordinate axis represents the anomalous geochemical parameter and the phase of its variation. The "maximum–minimum" indication along the Y-axis reflects whether a positive or negative phase anomaly of a given geochemical component is observed; this anomaly is graphically represented by a parabolic curve. The abscissa axis corresponds to the time remaining before the occurrence of a specific seismic event. This temporal interval was determined empirically and ranges from 1 to 16 days, indicating that geochemical anomalies manifest as transient variations exclusively within this pre-seismic time window.

Figure 4 illustrates short-period geochemical anomalies corresponding to the final stage of earthquake preparation within the given focal zone. The variations of the most informative parameters – chloride (Cl^-) and sulfide (S^{2-})—in the monitored groundwater systems are clearly distinguishable in the figure.

The observed hydrogeochemical variations demonstrate a clear temporal association with the seismic event, as the most pronounced anomalies in major ions, redox conditions (Eh), and dissolved gases occurred within a limited pre-seismic interval and decayed after the main shock. The synchronous increase in SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, ∑Fe, and helium, combined with a sharp decrease in $\sum(Cl, Br, I)^-$ and $\sum(Na, K)^+$, indicates a coupled response of the groundwater system to stress accumulation and fluid redistribution in the seismogenic zone. These correlations confirm that variations in groundwater chemistry are directly linked to seismic activation rather than random hydrogeochemical fluctuations.

Discussion and conclusions

The integration of geochemical data enabled a comprehensive assessment of groundwater responses to geodynamic processes preceding seismic events, rather than merely describing isolated chemical variations. The results demonstrate that the recorded hydrogeochemical anomalies represent a systematic response of groundwater systems to stress accumulation, fault activation, and deep fluid migration within the geological environment, and are closely related to lithological composition, tectonic disturbance, and deep fluid-dynamic conditions.

A combined analysis of macro- and microelement composition, ionic ratios, and geochemical indicators confirmed the high sensitivity of groundwater to variations in the physicochemical conditions of its formation environment.

Variations in the concentrations of major ions (SO_4^{2-}, CO_3^{2-}, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+), as well as a number of trace elements and gaseous components, were shown to reflect processes of water–rock interaction, redox reactions, ion exchange, and the influx of deep-seated fluids.

The integration of heterogeneous datasets made it possible to differentiate the contributions of surface and deep factors to the formation of groundwater chemical composition and identify zones of active geochemical transformation. It was established that groundwater can be regarded as an informative indicator of contemporary geochemical and tectonic processes, including the activation of fault zones.

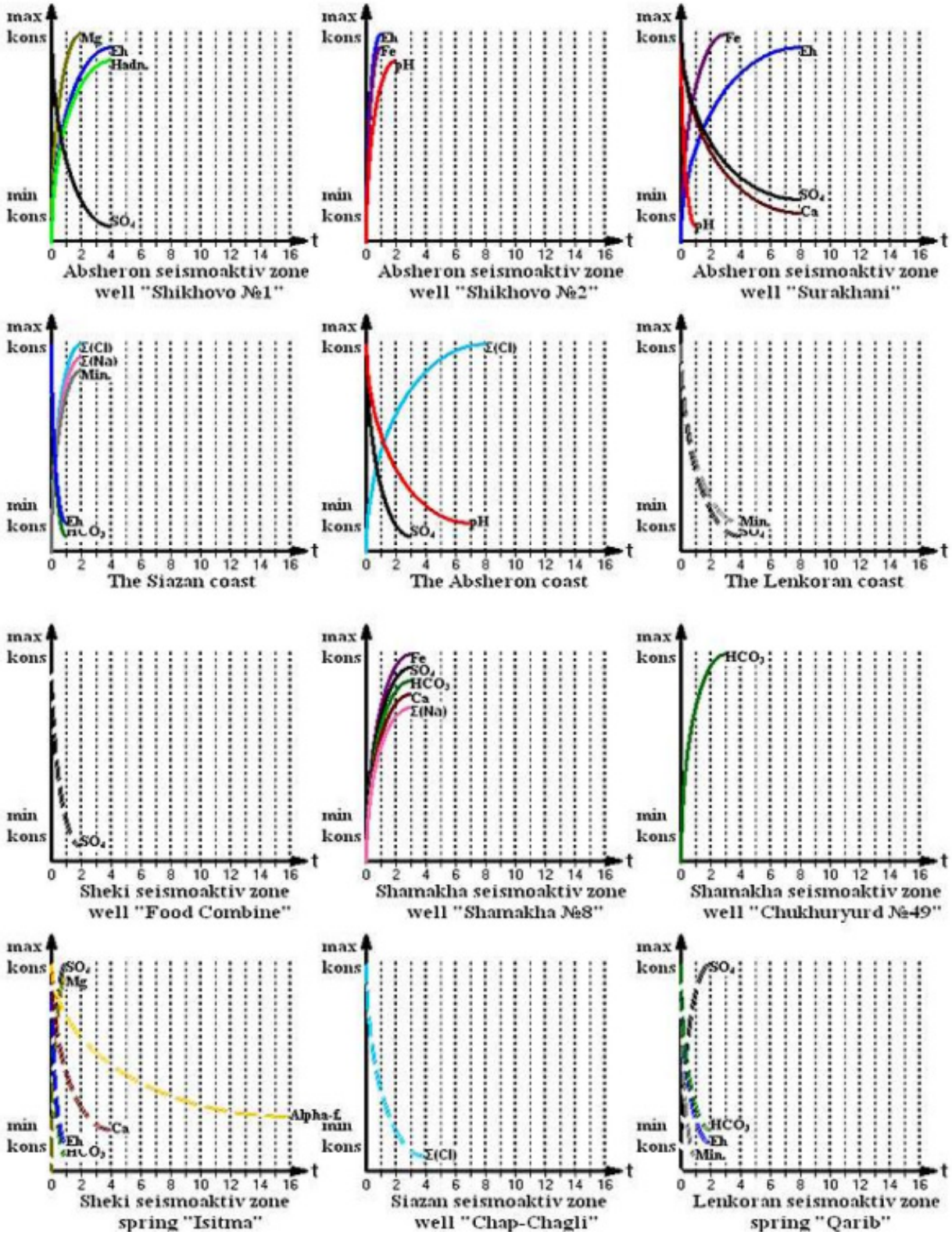


Fig. 3. Identification of stress–strain zones during seismic activation using geochemical fluid anomalies

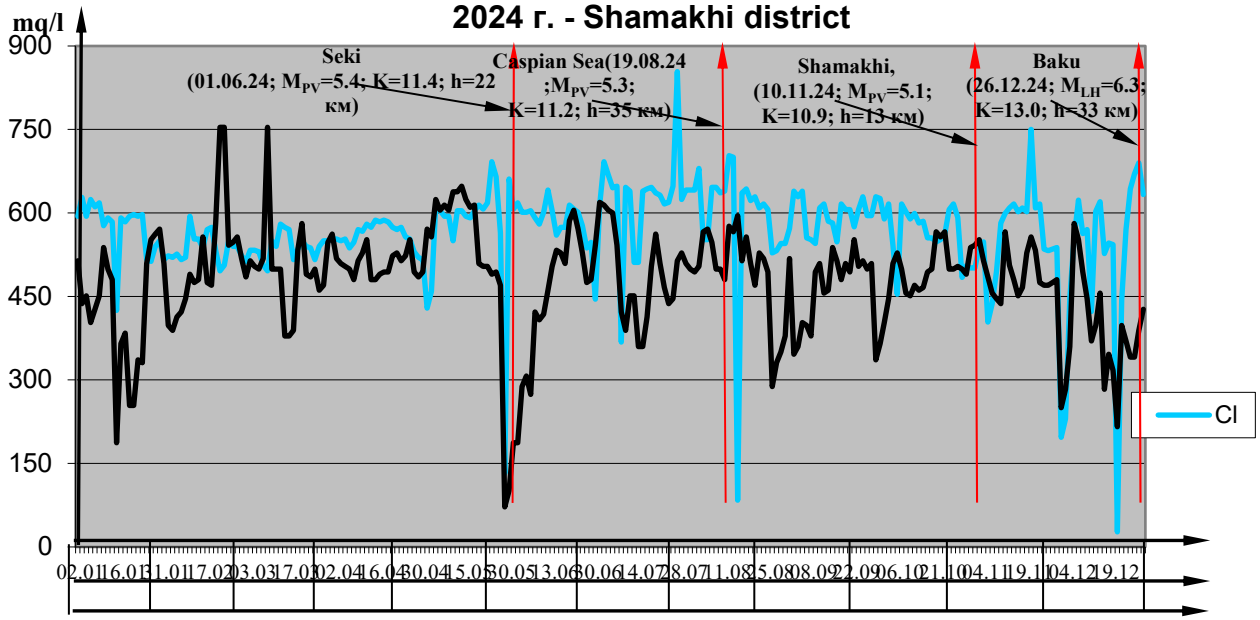


Fig. 4. Geochemical anomalies of groundwater during earthquakes. Spatial–temporal variations of the geochemical field prior to seismic events (using Cl^- and S^{2-} ions as examples)

The obtained results emphasize the effectiveness of an integrated geochemical approach for the study of natural mineral waters, monitoring of the geodynamic environment, and forecasting changes in hydrogeochemical conditions. Thus, geochemical data integration represents a reliable scientific basis for further regional investigations.

Importantly, the combined use of hydrochemical parameters, redox indicators, gas-geochemical data (helium), radiogeochemical measurements, and automated anomaly detection provides the basis for an operational multi-parameter monitoring framework. This framework allows the identification of short-term, pre-seismic hydrogeochemical signals and their discrimination from seasonal or hydrometeorological effects, thereby offering practical applicability for seismic hazard monitoring in tectonically active regions of Azerbaijan.

Key Findings. The following key findings summarize the results of the study in direct relation to the stated objectives of identifying groundwater anomalies, correlating them with seismic activity, and developing an operational monitoring approach.

1. The influence of the stress–strain field on the year-round geochemical monitoring regime of fluids during periods of seismic activation in Azerbaijan was investigated.

2. Characteristic patterns in the temporal dynamics of fluid geochemical fields during seismic activation in the Shamakhi seismogenic zone were identified.

3. Rapid methods for identifying different seismic sources were developed based on data from continuous geochemical monitoring of fluids.

4. Anomalies in fluid geochemical fields were shown to occur predominantly during the final stage of earthquake preparation, with a characteristic lead time predominantly ranging from 1 to 16 days.

5. Hydrogeochemical maps and temporal variation graphs were compiled for monitoring sites within the year-round geochemical observation network.

6. Fluid geochemical monitoring data were correlated with seismological parameters for all recorded earthquakes within the Shamakhi seismogenic zone.

7. Short-period geochemical anomalies exceeding background levels by 50–100 % were identified during continuous fluid monitoring. These anomalies are independent of seasonal and hydrometeorological influences and occur only during periods of increased seismicity and mud volcanic activity.

8. A method was developed to differentiate the azimuthal orientation of the stress–hydrodeformation field in the mountainous Shamakhi–Ismayilli zone based on geochemical fluid monitoring data.

Sources of funding. The authors declare the absence of external funding for the conduct of this study and preparation of the manuscript for publication.

References

Agamirzoev, R. A. (1989). *Seismotectonics of the Azerbaijani part of the Greater Caucasus*. Elm [in Russian]. [Агамирзоев, Р. А. *Сейсмотектоника Азербайджанской части Большого Кавказа*. Элм, 1989].

Akhmedbeyli, F. S., & Gasanov, A. G. (2004). *Tectonic types of seismic foci in Azerbaijan*. Elm [in Russian]. [Ахмедбейли, Ф. С., & Гасанов, А. Г. (2004). *Тектонические типы сейсмических очагов Азербайджана*. Элм].

Andrén, M., Stockmann, G., Skelton, A., Sturkell, E., Mörth, C.-M., Guðrúnardóttir, H. R., Keller, N. S., Odling, N., Dahrén, B., Broman, C., Balić-Žunić, T., Hjartarson, H., Siegmund, H., Freund, F., & Kockum, I. (2016). Coupling between mineral reactions, chemical changes in groundwater, and earthquakes in Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth,* 121, 2315–2337. https://doi.org/10.1002/2015JB012614

Barsukov, V. L. (Ed.). (1992). *Geochemical methods for earthquake forecasting*. Nauka [in Russian]. [Барсуков, В. Л. (Ред.). (1992). *Геохимические методы прогноза землетрясений*. Наука].

Barsukov, V. L., Serebrennikov, V. S., Varshal, G. M., & Garanin, A. V. (1979). Geochemical methods for earthquake prediction. *Geochemistry*, (3), 323–337 [in Russian]. [Барсуков, В. Л., Серебренников, В. С., Варшав, Г. М., & Гаранин, А. В. (1979). Геохимические методы прогноза землетрясений. Геохимия, 3, 323–337].

Biagi, P. F., Ermini, A., Kingsley, S. P., Khatkevich, Y. M., & Gordeev, E. I. (2000). Groundwater ion content precursors of strong earthquakes in Kamchatka (Russia). Pure and Applied Geophysics, 157, 1359–1377. https://doi.org/10.1007/PL00001123

Chiodini, G., Cardellini, C., Di Luccio, F., Selva, J., & Ventura, G. (2020). Correlation between tectonic CO_2 earth degassing and seismicity in the Apennines, Italy. Science Advances, *6*, eabc2938. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc2938

Chiodini, G., Frondini, F., Cardellini, C., Granieri, D., Marini, L., & Ventura, G. (2004). Carbon dioxide earth degassing and seismogenesis in central and southern Italy. *Geophysical Research Letters,* 31, L07615. https://doi.org/10.1029/2004GL019480

Igarashi, G., Saeki, S., Takahata, N., Sumikawa, K., Tasaka, S., Sasaki, Y., Takahashi, M., & Sano, Y. (1995). Ground-water radon anomaly before the Kobe earthquake in Japan. *Science,* 269(5220), 60–61. https://doi.org/10.1126/science.269.5220.60

Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E., & Neuzil, C. E. (2006). *Groundwater in geologic processes* (2nd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9780511807855

Kangarli, T. (2005). Greater Caucasus. In V. E. Khain & A. A. Ak. Alizadeh (Eds.), Geology of Azerbaijan: Tectonics (pp. 43–213). Nafta-Press.

Keramova, R. A. (2004). *Seismicity and geochemical fields of fluids of Azerbaijan* [Doctoral dissertation, Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences]. [in Russian]. [Керамова, Р. А. *Сейсмичность и геохимические поля флюидов Азербайджана*. (2004). Дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. ИФЗ РАН].

Kissin, I. G., & Grinevsky, A. O. (1990). Main features of hydrogeodynamic earthquake precursors. *Tectonophysics, 178*, 277–286. https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90154-Z

Matsumoto, N., & Koizumi, N. (2011). Recent hydrological and geochemical research for earthquake prediction in Japan. *Natural Hazards,* 69, 1247–1260. https://doi.org/10.1007/s11069-011-9980-8

Roeloffs, E. (1988). Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure and Applied Geophysics,* 126, 177–209. https://doi.org/10.1007/BF00878996

Shikhalibeyli, E. Sh. (1996). *Some aspects of geological structures and tectonics of Azerbaijan*. Elm [in Russian]. [Шихалибейли, Э. Ш. (1996). *Некоторые вопросы геологического строения и тектоники Азербайджана*. Элм].

Skelton, A., Liljedahl-Claesson, L., Wasteby, N., Andrén, M., Stockmann, G., Sturkell, E., Mörth, C.-M., Stefansson, A., Tollefsen, E., Siegmund, H., Keller, N., Kjartansdóttir, R., Hjartarson, H., & Kockum, I. (2019). Hydrochemical changes before and after earthquakes: Long-term measurements at two sites in northern Iceland. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth,* 124, 2702–2720. https://doi.org/10.1029/2018JB016757

Отримано редакцією журналу / Received: 21.01.26
Прорецензовано / Revised: 22.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Парвана АБДУЛРАЗАГОВА, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0002-0730-2901
e-mail: parvana.geo@gmail.com
Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан

ІНТЕГРАЦІЯ ГЕОХІМІЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ РЕАКЦІЙ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА ГЕОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ: ДОСЛІДЖЕННЯ НА ПРИКЛАДІ АЗЕРБАЙДЖАНУ

Вступ. ***Гідрогеохімічні зміни у підземних водах дедалі частіше розглядаються як потенційні індикатори акумуляції напружень, що передують землетрусам. Проте надійна ідентифікація короткочасних попередників можлива лише за умови довготривалих інструментальних спостережень та інтеграції багатьох типів даних, адаптованих до місцевих геологічних і гідрогеологічних умов. Шамахинсько-Ісмаїллинська сейсмогенна зона в Азербайджані, розташована на межі Євразійської та Аравійської плит, є унікальною природною лабораторією для вивчення гідрогеохімічних проявів геодинамічної активності. Метою дослідження є виявлення підземноводних аномалій, що передують сейсмічним подіям, визначення їх часових закономірностей щодо моменту землетрусу та оцінка ефективності інтегрованого геохімічного моніторингу для систем раннього попередження у Кавказькому регіоні.***

Методи. ***Створено багатопараметричну мережу спостережень із семи самовиливних свердловин і джерел, розташованих у контрастних літолого-гідрогеологічних умовах. Виконувалися систематичні, прив'язані до часу вимірювання показників pH, Eh, CO_3^{2-}, HCO_3^-, $\sum(Cl,Br,I)^-$, SO_4^{2-}, загальної твердості, Ca^{2+}, Mg^{2+}, $\sum(Na,K)^+$, мінералізації та $\sum(Fe^{2+},Fe^{3+})$. Гідрогеодинамічні параметри – рівень, температура, витрата і колір води – фіксувалися безперервно. Газогеохімічний моніторинг охоплював визначення розчиненого гелію, а радіогеохімічний контроль – вимірювання α-поля на реперних ділянках. Для виявлення суттєвих відхилень від сезонних фонів застосовано індекс аномальності ($A_{an} = K \times X \times \Sigma$), що дозволяє автоматично розпізнавати ненормальні тенденції.***

Результати. ***Перед землетрусом у Шамахі 18 січня 2023 року (Mpv 3.0; h = 18 км) було зафіксовано синхронні короткочасні гідрогеохімічні аномалії. Концентрація сульфатів (SO_4^{2-}) зросла з 440–480 до 640 мг/л, $\sum(Na,K)^+$ зменшилася з 700–750 до 450 мг/л, а $\sum(Cl, Br, I)^-$ різко знизилася з 630–660 до 60 мг/л. Вміст загального заліза ($\sum(Fe^{2+},Fe^{3+})$) підвищився з 6–15 до 48 мг/л, тоді як концентрація карбонатів (CO_3^{2-}) у свердловині Чухурюрд-49 зросла з 0 до 220 мг/л. Вміст гелію в підземних водах біля епіцентру збільшився майже на порядок, а згодом поширився по всій мережі. У свердловині "Шамахи-8" рівень води піднявся за вісім днів до поштовху, а за три дні до нього різко знизився, супроводжуючись потемнінням води.***

Висновки. ***Отримані результати підтверджують, що локальний багатопараметричний гідрогеохімічний моніторинг істотно підвищує ефективність виявлення та інтерпретації попередників землетрусів. Характер і амплітуда аномалій визначаються структурним положенням, гідрогеологічним режимом та глибиною осередку. Інтеграція гідрогеохімічних, гідродинамічних, газових і радіогеохімічних даних із геодезичними та мікросейсмічними спостереженнями підвищує надійність прогнозу та зменшує кількість хибних спрацьовувань. Такий міждисциплінарний підхід може зміцнити систему оцінки сейсмічної небезпеки регіону та сприяти створенню оперативної системи раннього попередження для всього Кавказького регіону.***

Ключові слова: ***Азербайджан; попередники землетрусів; геодинамічні процеси; підземні води; гелій; гідрогеохімічний моніторинг; сульфати.***

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 553.982
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.09

Vagif KARIMOV, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8849-7696
e-mail: vaqif.karimov@asoiu.edu.az
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Rufat SHAHBAZOV, PhD Student
ORCID ID: 0009-0003-6009-3982
e-mail: rufetshaxbazov@gmail.com
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE ON RIVER WATER RESOURCES AND MODELING OF WATER CONSUMPTION REGULATION

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

Background. *It is very difficult to deny or confirm the impact of climate change on the existing water resources of the republic, as there are very few reliable facts and data available. However, the undeniable fact is that climate factors change over a large period of time. One of the main indicators of climate change is the decrease in the number of cold autumn-winter days, the increase in the number of hot spring-summer days and the periodic occurrence of drought on the plain areas of the country.*

Objective: Study of global climate change, its causes and consequences; assessment of the existing water resources in the country and the state of their use; assessment of the impact of global climate change on the existing water resources of the republic; forecasting the impact of climate change on water management for the near, medium and long term; application of a scientifically based approach and modeling of water resource consumption for the purpose of efficient use of water resources, as well as determination of the upper, average and lower limits of consumption.

Methods. *Shewart control chart and extrapolation and summation of the water consumption methods are used.*

Results. *The analysis shows that the change in the dynamics of water resources is related to the increase and decrease in water taken from the river, changes in natural climatic factors, mainly the amount of precipitation over the years. The decrease in the domestic consumption of rivers does not at all give grounds to conclude that their natural flow consumption has decreased. An example of this is the floods that occurred in the Kura and Araz rivers in 2003 and 2010. In short, due to the number of anomalous events in nature, they can be considered a "product" of global climate change.*

Conclusions. *We came to the conclusion that the water consumption varies from year to year and depends on many factors, such as climate changes, population growth, industrial, and agricultural use. Analysis of existing meteorological data shows that nature is full of surprises, various natural phenomena, including severe and persistent droughts, can occur unexpectedly. To be ready for it, one of the important conditions is to gradually increase existing water resources, create water-saving techniques and technologies, and develop new agrotechnical measures.*

Keywords: *climate change, water resources, water consumption, temperature, decrease, water scarcity.*

Background

Climate change, while not unprecedented in Earth's history, has markedly intensified in recent centuries, detrimentally impacting global water resources (Rosińska et al., 2024). This significantly impacts water systems worldwide. Rising temperatures, altered precipitation patterns, and increased frequency of extreme weather events are leading to water scarcity in some regions, while others experience more intense floods. These changes affect water availability, quality, and the overall reliability of water resources, impacting ecosystems, human populations, and various sectors like agriculture and industry (Fecht, 2019).

According to Alsaadawi and Ozkoç (2022) opinion the climate change, including evaporation, groundwater recharge, temperature, flow, and precipitation changes, has a significant impact on water quality and quantity. In addition, increasing water temperatures affect the chemical reaction kinetics and ecological status of the waters along with the deterioration of quality. With increased flow, such changes can affect the mobilization, distribution, mobility, dilution, and habitat of pollutants in the hydrological system.

Global climate change is characterized by changes in temperature, precipitation and evaporation (Abdullayev, & Rzayev, 2023; Huseynov, & Tagiyev, 2024; Huseynov, Tagiyev, & Balammadov, 2024; Nasibova et al., 2024). This is one of the main factors in the decline of water resources. In addition, there is another factor that does not leave water resources untouched. HUMAN FACTOR! It is the interference of people in nature and their neglect of the preservation of ecological balance.

It is well known to everyone that the planet we live on is not that big. When you look at the world map, it becomes clear that there is no part (space) on Earth where bombs do not explode, new types of weapons are not tested, countless airplanes do not disrupt the structure of the atmosphere, mountains that ensure the balance of the earth are not gradually destroyed and devastated, forests are not cut down and destroyed, the beds of rivers, lakes and their surroundings are not ruthlessly exploited for various purposes, the living world of nature – flora and fauna – is not destroyed, the lands are not exhausted from excessive use, skyscrapers are not built in cities, the oceans and seas are not loaded with oil platforms, millions of tons of toxic gases and substances are not released into the air from industrial facilities and vehicles, areas are not polluted with household waste, and so on and so forth. These listed and unmentioned facts are some kinds of indicators of global climate change.

It is very difficult to deny or confirm the impact of climate change on the existing water resources of the republic. However, it is an undeniable fact that climatic factors change over a large period of time. One of the main indicators of climate change is the decrease in the number of cold autumn-winter days, the increase in the number of hot spring-summer days, and the periodic occurrence of drought on the plains of the country.

© Karimov Vagif, Shahbazov Rufat, 2026

Methods

According to the World Bank report on droughts in Central Asia and the Caucasus in 2005, the air temperature increased by 0.3–0.6°C and the amount of precipitation decreased by 10 % in 1961–1990 (WB, 2005). Depending on the temperature, the flow of rivers decreased by 10–20 %, and at the same time, the snow cover falling on the territory of the country began to decrease. According to the same report, a decrease of 9.5–11.5 km^3 of water resources is expected by 2050.

The impact of climate change is also reflected in the rivers flowing through the territory of Azerbaijan (Safarov, & Mahmudov, 2011). Thus, the Kura, Alazan, Ayrichay (Ismailova et al., 2022; Mustafayeva & Tagiyev, 2023; Rzaeva, Tagiyev, & Zeynalova, 2022) and Araz rivers can be noted. The World Bank information on the flow of these rivers is given in the table below.

According to the information provided by the World Bank, or rather, the source it used (regional ecological center), the flow of the Kura River has decreased by more than 2 times compared to the natural multi-year data. A similar trend is observed in other sample rivers (Table 1, fig. 1, 2) (Aslanov, 2013).

Table 1

Flow of some rivers in 1981–2000, m^3/sec

Periods by year	Seasons				Annual average
	Winter	Spring	Summer	Autumn	
Kura River (Tbilisi region)					
1981–2000	98	429	251	135	230
1981–2000 (observed)	86	382	198	107	192
2000–2010 (observed)	119	351	185	115	190
Kura River (Salyan region)					
1981–2000	403	1528	897	527	840
1981–2000 (observed)	495	615	410	342	466
2000–2010 (observed)	500	510	332	334	411
Araks (Givrag point)					
1981–2000	86,6	399	181	99	190
1981–2000 (observed)	67,5	305	142	76,9	148
2000–2010 (observed)	105	211	69	91	119
Alazan-Ayrichay					
1981–2000	> 4	169	19	107	127
1981–2000 (observed)	>4	151	125	89	109
2000–2010 (observed)	>7	126	110	86	104

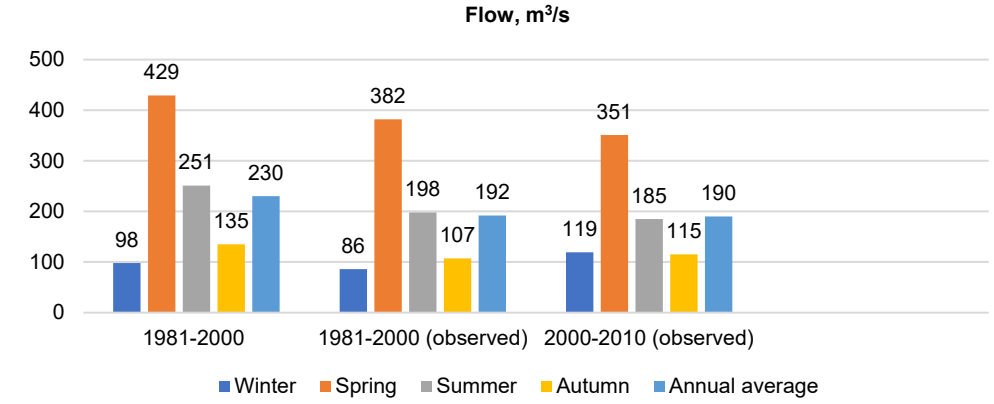


Fig. 1. Flow rate of the Kura River through the Tbilisi region, m^3/s

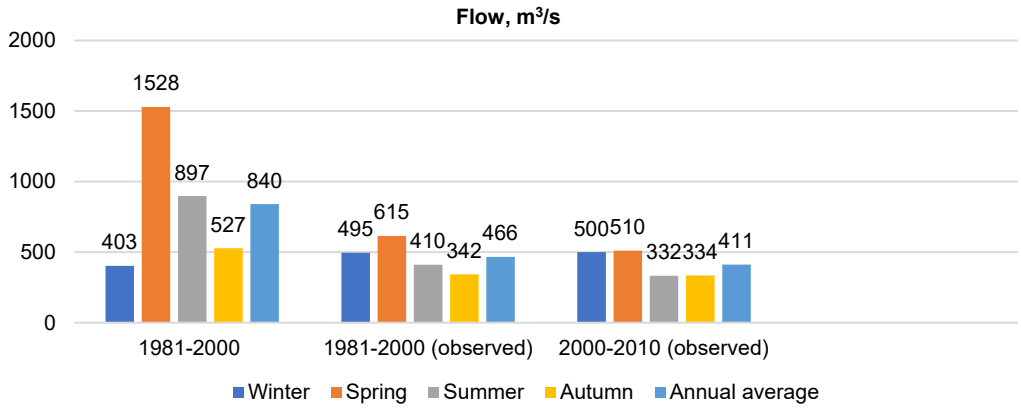


Fig. 2. Flow rate of the Kura River through the Salyan region, m^3/s

Data from after 2000 and even before 2000 are presented in different sources with different figures. For example, in the literature (WB, 2005) it is shown that the natural flow rate of the Kura River in the Salyan settlement was 854 m^3/sec until 1989. However, in the literature (Aslanov, 2013) it is stated that this flow rate was 354 m^3/sec, and in the World Bank report it is stated that it was 840 m^3/sec (see table 1). The data of recent years also show that the flow rate of the Kura and other rivers has decreased in the headwaters (Aslanov, 2013).

The above-mentioned fact is more clearly visible from the hydrometric data (Table 2).

Table 2

Average monthly water consumption at various points, m^3/sec

Period per year	Monthes, water consumption, m^3/sec												Av./y
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Zardab point													
1980–2010	242	255	349	805	1059	797	445	275	263	345	328	252	452
2011–2020	384	399	370	318	317	361	318	253	264	264	300	361	328
Surra (Sabirabad) point													
1980–2010	420	437	615	1270	1834	1411	791	484	423	525	524	443	765
2011–2020	589	596	614	806	913	687	395	326	399	440	486	554	566
1981–2007	523	522	521	536	589	507	341	328	306	321	406	498	450
Salyan point													
1980–2010	390	595	542	1142	1687	1226	636	331	315	417	452	386	660
2011–2020	567	548	586	771	883	666	360	272	354	401	405	526	531
1981–2010	483	485	493	512	566	514	325	250	294	308	384	477	426

Data from hydrometric stations located on the Kura River show that the flow of the river in the estuary of the Kura River (in the Salyan point) is lower than the flow in its upper part (in the Surra point of the Sabirabad region) in all observation periods. While the average multi-year domestic flow of the Kura River in 1980–1910 was 765 m^3/sec in the Surra point, 566 m^3/sec in 2011–2020, and 450 m^3/sec in 1981–2007, these values were 660, 531, and 426 m^3/sec in the Salyan point, respectively, for the same periods. That is, the Kura is higher in the upper part of the flow, and lower in the estuary. At first glance, this seems to be anomalous. In fact, as mentioned above, this is due to the withdrawal of water from various places along the river for irrigation and other purposes.

It is clear that the instability of the Kura River's domestic flow over the decades is related to demand (Table 3). The average domestic flow of the Kura River during the 1970–1980s was 607.8 m^3/sec, during the 1981–1990s it was 438.1 m^3/sec, during the 1991–2000s it was 411.2 m^3/sec, during the 2001–2010s it was 398.4 m^3/sec, and during the 2011–2020s it was 435.6 m^3/sec. In the 1970–2010s, the domestic flow of the Kura River gradually decreased, but later began to increase. Analyses show that this change is due to the increase and decrease in water taken from the river, and changes in natural climatic factors, mainly the amount of precipitation over the years. The decrease in the river's domestic consumption does not at all give grounds to conclude that its natural flow consumption has decreased. An example of this is the floods that occurred in the Kura and Araks rivers in 2003 and 2010. In short, the number of anomalous events in nature can be considered a "product" of global climate change (Rzaeva, Guseynov, & Tagiyev, 2023; Shiraliyev, & Mahmudov, 2008).

Results

If we look at the exploitation of rivers, we will see that the decrease in their flow in the upstream part is not directly related to global climate change. It is simply that water is taken from these rivers for various purposes, for example, irrigation, water supply, etc., and these waters are used without being returned. Therefore, the flow of rivers is not a natural flow, but a domestic flow. At the same time, water is taken directly from the river through pumping stations located at various points on the rivers and directed for various purposes.

Irregular use of water resources leads to scarcity. Many methods are used to regulate such negative situations.

Examples of Surface Water Regulation:

1) The Surface Water Treatment Rule (SWTR): the SWTR establishes minimum treatment requirements for public water systems using surface water as a source.

2) The Water Framework Directive (WFD): the WFD aims to achieve good ecological and chemical status for all surface water bodies.

3) River Basin Management Plans: outline strategies for managing water resources within specific river basins.

In essence, a surface water regulation system is a complex but vital framework for ensuring that surface water resources are managed sustainably, protecting both human health and the environment (internet materials).

In our study, the Shewhart control chart method was used. Control charts were constructed and analyzed using average annual and characteristic flow rates (Table 3) in the Salyan region located along the Kura River. (Fig. 3, 4, 5).

Levels of water consumption vary significantly across the Salyan point of the Kura River.

Given that access to fresh drinking, irrigation, industrial uses waters is a global problem, every drop counts. Applying responsible tendency at home, in industry, in irrigation not only reduces consumption but also helps preserve natural water resources. Little changes, such as taking shot showers, reusing water for irrigation purposes, and using effective appliances, make a big difference.

Water is the only substance found on earth in three forms – solid, liquid, and gas. A person can live more that a month without food, but only about a week, depending on conditions, without water. 66 % of the human body is water; 75 % of the human brain is water. A person must consume 2.5 quarts of water per day from all sources (drinking, eating) to maintain health. Water regulates the earth's temperature. It also regulates the temperature of the human body, carries nutrients and oxygen to cells, cushions joints, protects organs and tissues, and removes wastes (Environmental Protection Agency, 2024). Therefore, the regulation of the water resources is a crucial challenge.

The visualization shows the average level of water consumption per year (Fig. 3).

Based on the method, the average, upper and lower limits of the average annual water consumption have been determined: $X_{av.}$=458.22 m^3/s; X_{upper}=840.72 m^3/s; X_{lower}=75.72 m^3/s. The upper and lower limits of regulation are symmetrical with the middle limit. Although the

consumption is within the regulation limits, there are fluctuations in water consumption. As shown, there is a large variance in levels of water consumption rates across the Salyan region. This can depend on a range of factors, including climate and the importance of a region's agricultural or industrial sector.

The visualization below (Fig. 4) shows the maximum annual water consumption of the Kura River which is used for irrigation, municipal and industrial purposes. The average, upper and lower limits of maximum water consumption by year have been determined: $X_{av.}$=1053 m^3/s; X_{upper}=2233 m^3/s; X_{lower}=127 m^3/s. The upper and lower limits of the adjustment are symmetrical with the average limit.

As mentioned above, the water is used by costumers continously. Their use fluctuates widely depending on factors such as temperature (a major driver climate change), cases of droughts leading to water scarcity. For this reason, the water needs of the population of the settlements on the banks of the Kura River are increasing. Thus, the maximum water consumption occurred in 1979 and amounted to 2350 m^3/s. This exceeded the upper regulatory limit of the water consumption. These fluctuations lead to demand peaks. Peaks reflect the deviation of water consumption of settlements located along the Kura River for a certain period of time (day, week, month or year), from the average value for the same period. The peaks are used to eliminate the water loses and exceeding regulatory water consumption limits.

Table 3

Average annual and characteristics of consumption of the Kura River in the Salyan point, m^3/sec

Years	Annual water consumption, m^3/s	Maksimum	Minimum	Years	Annual water consumption, m^3/s	Maksimum	Minimum
1970	630	1400	+97	1996	216	718	37
1971	403	833	123	1997	412	798	88
1972	277	521	60	1998	622	1500	356
1973	819	1990	222	1999	354	733	148
1974	719	1740	222	2000	347	1012	135
1975	524	1060	229	2001	372	1030	181
1976	473	1310	164	2002	433	750	235
1977	490	1770	125	2003	698	1763	369
1978	663	2220	242	2004	624	1126	304
1979	736	2350	138	2005	382	418	92
1980	344	772	160	2006	339	544	107
1981	219	436	82	2007	252	544	119
1982	461	1047	116	2008	346	602	214
1983	518	1160	183	2009	271	454	23
1984	461	1060	145	2010	267	617	75
1985	382	1220	132	2011	171	375	832
1986	564	1770	225	2012	286	77	170
1987	424	868	160	2013	670	1295	190
1988	589	1720	214	2014	497	940	241
1989	410	896	215	2015	485	760	237
1990	353	682	167	2016	483	1060	306
1991	327	623	64	2017	372	785	158
1992	563	983	195	2018	343	1050	265
1993	390	676	150	2019	356	965	311
1994	546	1150	219	2020	693	1385	196
1995	335	1090	104				

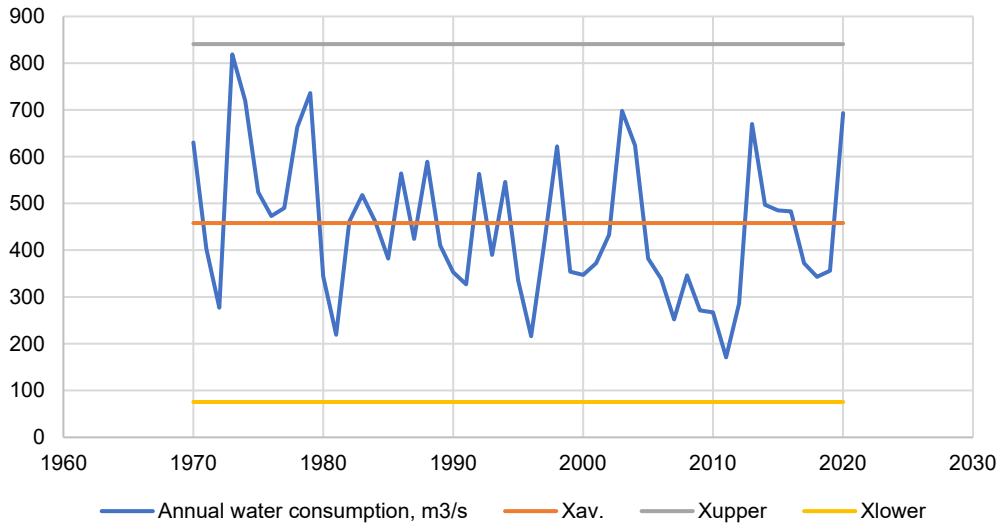


Fig. 3. Annual water consumption regulation chart of the Kura River in the Salyan point

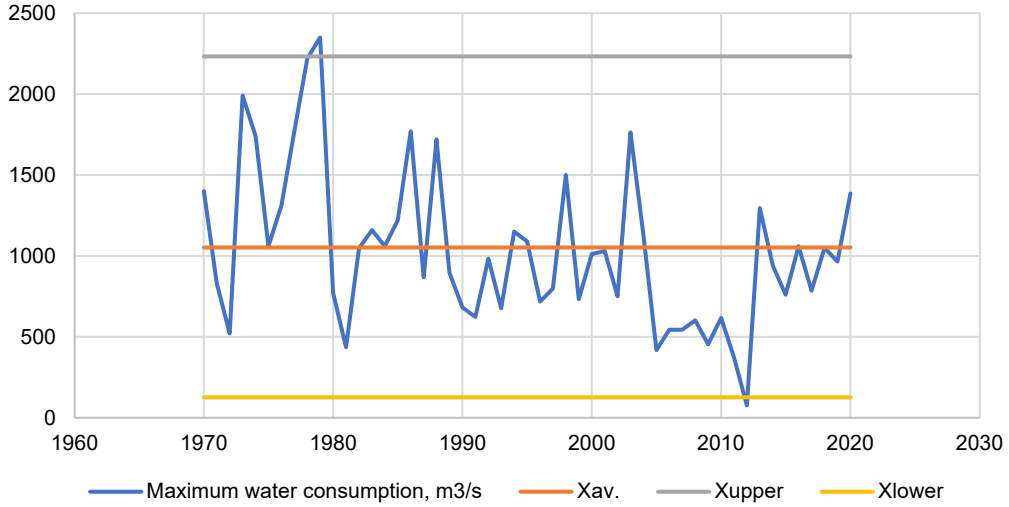


Fig. 4. Maxsimum water consumption regulation chart of the Kura River in the Salyan point

The minimum water consumption of the river water coincides with 2003, which is 127 m^3/s.

Figure 5 shows the minimum water consumption of Kura River in a certain time period (1970–2020).

The average, upper and lower limits of minimum water consumption have been determined by year: $X_{av.}$=187 m^3/s; X_{upper}=460 m^3/s; X_{lower}=87 m^3/s.

As can be seen in Figure 5, the minimum water consumption regime differs from the maximum one. The minimum water consumption regulation limit is not symmetrically relative to the average limit. There are peaks beyound the lower control limit. Except for 2001, water consumption exceeded the upper limit. While the upper limit of water consumption was 460 m^3/s, the consumption in this year was 832 m^3/s, the consumption in all years was between the average and lower limit and beyound the lower limit.

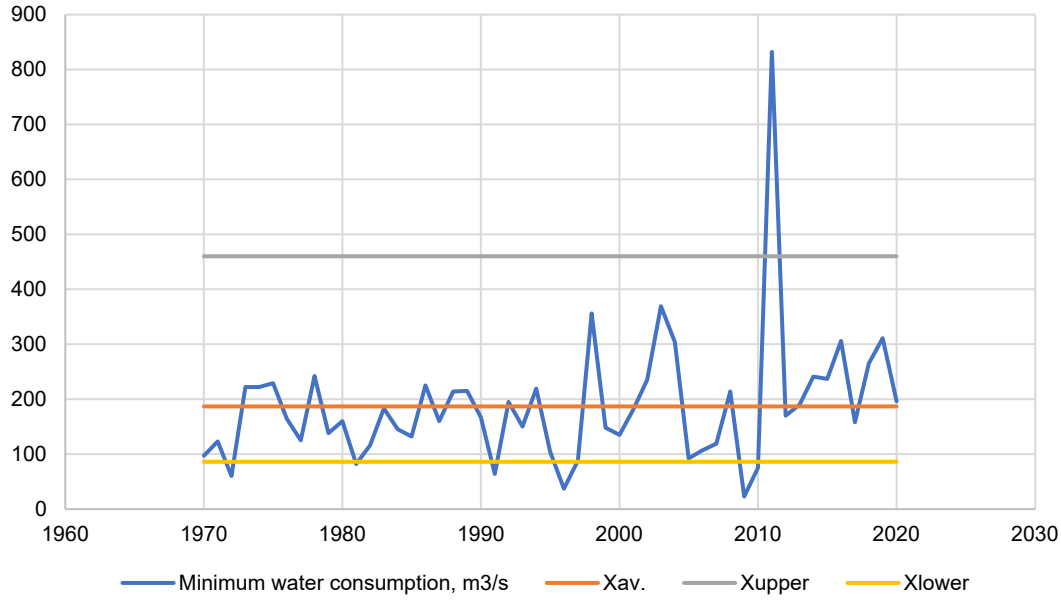


Fig. 5. Minimum water consumption regulation chart of the Kura River in the Salyan point

It can be concluded that the peak factors depend on climate changes over years. The reason for this situation is drought, which is a consequence of climate change.

The second method for regulation of water resourses is extrapolation and summation of the water consumption per population living along the bank of the Kura River. This method is more detailed and requires much more annual data. Extrapolation is based on the assumption that water consumption increases or decreases by a fixed growth coefficient as noted by the following formula:

$$consumption_p + n = consumption_p \times GC_n$$

where: $consumption_p$ – consumption in period p; $consumption_p + n$ – consumption in period p+n; n – number of years; GC = Growth Coefficient per year.

When planning the future water consumption, it is important to determine when the capacity increase is necessary. So, the legal supply obligation is important, meaning that the available capacity must always be larger than the consumption. Growth Coefficient per decade and growth per year in the Table 4 was shown.

Table 4

Growth Coefficient per decade and growth per year

	1961–1970	1971–1980	1981–1990	1991–2000
Growth Coefficient	1.72	1.16	1.22	0.96
Growth per year	5.6 %	1.5 %	2.0 %	-0.4 %
Average over				
Last 50 years	2.7 %	2.7 %	2.7 %	2.7 %
Last 40 years	2.2 %	2.2 %	2.2 %	2.2 %
Last 30 years		0.1 %	0.1 %	0.1 %
Last 20 years			0.8 %	0.8 %
Last 10 years				-0.4 %

Discussion and conclusions

Ultimately, we came to the conclusion that the water consumption varies from year to year and depends on many factors, such as climate changes, population growth, industrial, and agricultural use.

By considering the rate of climate change and population growth, water consumption will continue to decrease from year to year if we do nothing.

Analysis of current meteorological data shows that nature is full of surprises, various natural phenomena, including severe and persistent droughts, which can occur unexpectedly. To be prepared for them, one of the important conditions is to gradually increase existing water resources, create water-saving techniques and technologies, and develop new agrotechnical measures.

Authors' contribution: Vagif Karimov – conceptualization, methodology, writing (original draft), formal analysis; Rufat Shahbazov – data curation, visualization, writing (review and editing).

Sources of funding. The authors declare the absence of external funding for the conduct of this study and preparation of the manuscript for publication.

References

Abdullayev, P. A., & Rzayev, V. R. (2023). Issues of regulation and management of water use in Azerbaijan against the background of global climate changes. In *The development of the water sector of Azerbaijan is connected with the name of the national leader Heydar Aliyev: Materials of the scientific-practical conference* (pp. 444–447) [in Azerbaijani]. [Abdullayev P. A., & Rzayev V. R. (2023). Issues of regulation and management of water use in Azerbaijan against the background of global climate changes. Materials of the scientific-practical conference on "The development of the water sector of Azerbaijan is connected with the name of the national leader Heydar Aliyev", 444–447].

Alizadeh, A. A., Alekperov, A. B., Aliev, F. Sh., Israfilov, R. G. et al. (2008). *Geology of Azerbaijan. Vol. VIII. Hydrogeology and engineering geology*. Nafta-Press [in Azerbaijani]. [Alizadeh A. A., Alekperov A. B., Aliev F. Sh., Israfilov R. G. et al. (2008). *Geologija Azerbajdzhana. T. VIII. Gidrogeologija i inzhenernaja geologija*. Publishing house. "Nafta-Press", 380].

Aslanov, H. Q. (2013). *Ecological and geographical problems of the lower reaches of the Kura River*. Chashoglu [in Azerbaijani]. [Aslanov H.Q. (2013). Jekologo-geograficheskie problemy nizhnij techenij reki Kury. Chashoglu, 234].

Drought. Assessment of management and mitigation of effects for the countries of Central Asia and the Caucasus (World Bank Report No. 31998). (2005). ECA [in Russian]. [Засуха. Оценка управления и смягчения эффектов для стран Центральной Азии и Кавказа (Отчет Всемирного Банка № 31998). (2005). ECA].

Environmental Protection Agency. (2024). *Water facts* (No. 2). Department of Republic Health.

Fecht, S. (2019, September 23). *How climate change impacts our water*. News from the Columbia Climate School.

Global warming. (2016). Wikipedia [in Russian]. [Глобальное потепление. (2016). Wikipedia]. https://ru.wikipedia.org/wiki/Глобальное_потепление

Global warming: Facts, hypotheses, comments. (2016). Wikipedia [in Russian]. [Глобальное потепление: Факты, гипотезы, комментарии. (2016). Wikipedia]. https://ru.wikipedia.org/

Gulmammadov, C., Mammadova, M., & Tagiyev, A. (2022). Hydrogeological conditions of the Shirvan steppe of Azerbaijan. *Reliability: Theory & Applications*, 17(SI 4 (70)), 274–281. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-470-274-281

Huseynov, D., & Tagiyev, A. (2024). Characteristics of the impact of climate change on air temperature in the territory of Azerbaijan during the period of global climate change. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology,* 3(106), 76–82. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.10

Huseynov, J. S., Tagiyev, A. S., & Balammadov, S. R. (2024). Characteristics of air temperature on the southern and southeastern slopes of the Greater Caucasus in the modern period. *Journal of Geology, Geography and Geoecology,* 33(3), 475–484. https://doi.org/10.15421/112444

Ismailova, M., Maharramov, F., Karimov, V. M., & Sharifov, J. J. (2022). Groundwater of Ganikh-Ayrichay foothills on the prospects of use. *Reliability: Theory & Applications*, *17*(SI 3 (66)), 113–118. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-366-113-118

Ismayilova, M., & Tagiyev, A. (2024). Research of thermal and mineral waters formation conditions in the Azerbaijan part (Karabakh and Nakhchivan) of the South Caucasus. *Reliability: Theory & Applications*, 19(SI 6 (81)), 601–608. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2

Mustafayeva, E., & Tagiyev, A. (2023). Perspective of using groundwater in the Ganikh-Ayrichay foothills. *Reliability: Theory & Applications*, 18(SI 5 (75)), 136–141. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-136-141

Namazov, I. Sh., Karimov, V. M., Sharifov, J. J., & Pashayeva, Sh. V. (2024). Modern hydrogeological conditions of the Absheron peninsula. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4(107), 114–121. https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.14

Namazov, I., Tagiyev, A., & Sharifov, J. (2024). Perspectives of use of mineral and thermal waters formed in Talish territory. *Reliability: Theory & Applications*, 19(SI 6 (81)), 595–600. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2024-681-595-600

Nasibova, G. C., Gasimov, E. E., Qanbarova, Sh., Karimov, V. M., Davardoost, H., Zimina, D. A., & Viktorovich, A. S. (2024). Structural dynamics and resource potentional of the South Caspian megadepression: Insights from mud volcanism and oil-gas exploration. *International Journal of Engineering*, 38(5), 1010–1018. https://doi.org/10.5829/IJE.2025.38.05B.05

Reshat Dogru. (2013, December 18). *Global climate change, causes, actions and possible consequences for the countries participating in the CHES* [Conference presentation]. Tbilisi [in Russian]. [Решат Догру. (2013, 18 декабря). Глобальное изменение климата, причины, действия и возможные последствия для стран-участников ЧЭС: Доклад. Тбилиси].

Rosińska, W., Jurasz, J., Przestrzelska, K., Wartalska, K., & Kaźmierczak, B. (2024). Climate change's ripple effect on water supply systems and the water-energy nexus – A review. *Water Resources and Industry*, 32, 100266. https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100266

Rzaeva, S., Tagiyev, A., & Zeynalova, S. (2022). Impact of climate change on the groundwater of the Ganikh-Ayrichay foothills. *Reliability: Theory & Applications*, 17(SI 4 (70)), 180–187. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-470-180-187

Rzaeva, S., Guseynov, J., & Tagiyev, A. (2023). Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. *Reliability: Theory & Applications*, 18(SI 5 (75)), 404–410. https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410

Safarov, S. H., & Mahmudov, R. N. (2011). *Modern climate changes and Azerbaijan*. Ziya [in Russian]. [Сафаров С. Г., Махмудов Р. Н. (2011). *Современные изменения климата и Азербайджан*. Зия].

Shaymaa Alsaadawi, & Hulya Boke Ozkoç. (2022, May 19). *Global climate change impacts on water quality, and quantity*. International Congress on Innovative Scientific Approaches, 78–84.

Shiraliyev, S., & Mahmudov, R. (2008). *Hydrometeorological conditions and dangerous hydrometeorological events in Azerbaijan*. Ziya-Nurlan [in Russian]. [Ширалиев С., Махмудов Р. (2008). *Гидрометеорологические условия и опасные гидрометеорологические явления в Азербайджане*. Зия-Нурлан].

Yahyayev, V. F., Tagiyev, A. S., Manyuk, V. V., & Rzayev, S. M. (2024). Influence of sand-gravel quarrying on the river bed and environment (the case of Valvalachay river). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 33(2), 398–405. https://doi.org/10.15421/112437

Отримано редакцією журналу / Received: 23.01.26
Прорецензовано / Revised: 24.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Вагіф КАРІМОВ, доц.
ORCID ID: 0000-0001-8849-7696
e-mail: vaqif.karimov@asoiu.edu.az
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

Руфет ШАХБАЗОВ, асп.
ORCID ID: 0009-0003-6009-3982
e-mail: rufetshaxbazov@gmail.com
Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

ОЦІНКА ВПЛИВУ ГЛОБАЛЬНОЇ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА РІЧКОВІ ВОДНІ РЕСУРСИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВОДОСПОЖИВАННЯ

В с т у п . ***Заперечити чи підтвердити вплив зміни клімату на існуючі водні ресурси республіки дуже важко. Оскільки достовірних фактів та даних дуже мало. Однак незаперечним фактом є те, що кліматичні фактори змінюються протягом великого періоду часу. Одним з основних показників зміни клімату є зменшення кількості холодних осінньо-зимових днів, збільшення кількості спекотних весняно-літніх днів та періодичне виникнення посухи в рівнинних районах країни.***

Мета. Вивчення глобальної зміни клімату, її причин та наслідків; оцінка існуючих водних ресурсів у країні та стану їх використання; оцінка впливу глобальної зміни клімату на існуючі водні ресурси республіки; прогнозування впливу зміни клімату на управління водними ресурсами на найближчу, середньо- та довгострокову перспективу; застосування науково обґрунтованого підходу та моделювання споживання водних ресурсів з метою ефективного використання водних ресурсів, а також визначення верхньої, середньої та нижньої меж споживання.

М е т о д и . ***Використано контрольну карту Шуарта та метод екстраполяції та підсумовування водоспоживання.***

Р е з у л ь т а т и ***та обговорення: Аналіз показує, що зміна динаміки водних ресурсів пов'язана зі збільшенням та зменшенням обсягів забору води з річки, змінами природних кліматичних факторів, головним чином кількості опадів протягом років. Зменшення побутового споживання річками зовсім не дає підстав робити висновок про зменшення їх природного стоку. Прикладом цього є повені, що сталися на річках Кура та Араз у 2003 та 2010 рр. Коротше кажучи, через кількість аномальних подій у природі їх можна вважати "продуктом" глобальної зміни клімату.***

В и с н о в к и . ***Ми дійшли висновку, що споживання води змінюється з року в рік і залежить від багатьох факторів, таких як зміни клімату, зростання населення, промислове та сільськогосподарське використання. Аналіз існуючих метеорологічних даних показує, що природа сповнена сюрпризів, різні природні явища, включаючи сильні та стійкі посухи, можуть виникати несподівано. Щоб бути до цього готовим, однією з важливих умов є поступове збільшення існуючих водних ресурсів, створення водозберігаючих методів і технологій, а також розробка нових агротехнічних заходів.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***зміна клімату, водні ресурси, споживання води, температура, зниження, дефіцит води.***

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

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

УДК 556.3+624.131.1:[910:004.65]:004.942(477.411)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.10

Олексій КОШЛЯКОВ, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-3090-4855
e-mail: akoshliakov57@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Оксана ДИНЯК, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-7147-0769
e-mail: dyniak_o_v@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ірина КОШЛЯКОВА, інж.
ORCID ID: 0000-0002-2293-8441
e-mail: iryna.koshliakova@knu.ua
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОФІЛЬТРАЦІЇ НА УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

В с т у п . ***Метою дослідження є розроблення теоретичних концепцій та прикладних підходів до моделювання гідрогеологічних процесів у просторі й часі під впливом природних і антропогенних чинників.***

М е т о д и . ***Гідрогеологічне моделювання є одним із найефективніших і найнадійніших інструментів для вивчення та прогнозування процесів підземного стоку. Серед числових методів найчастіше застосовується метод кінцевих різниць, реалізований у відомому програмному пакеті Processing MODFLOW. Точне визначення гідродинамічних тисків на етапі епігнозного моделювання є ключовим для підвищення точності прогнозних розрахунків. Для уточнення геофільтраційних параметрів водоносних порід і інтенсивності інфільтраційного живлення необхідно скоригувати поверхню гідродинамічного напору. Досягнення точності параметрів можливе тоді, коли модельні значення напору узгоджуються з фактичними вимірами в межах допустимої похибки. Для підвищення достовірності просторового положення поверхні гідродинамічного напору запропоновано використовувати незалежний від гідрогеологічного моделювання інструмент – модуль Darcy Flow у середовищі ArcGIS – для відтворення поверхні напору перед етапом калібрування.***

Р е з у л ь т а т и . ***Запропонований підхід апробовано на прикладі житлового району м. Києва. Напрям і загальна тенденція підземного потоку, визначені на першому етапі в середовищі ArcGIS за допомогою модуля Darcy Flow, були використані для калібрування геофільтраційних параметрів моделі та інтенсивності інфільтраційного живлення шляхом порівняння розрахованих рівнів ґрунтових вод із фактичними даними спостережень. Високий ступінь збігу польових і модельних результатів визначення гідродинамічного напору у вибраних точках підтверджує достовірність і точність отриманих результатів моделювання. Проведені розрахунки доводять ефективність комплексного використання модуля Darcy Flow (ArcGIS) та програмного пакета Processing MODFLOW для гідрогеологічного аналізу.***

В и с н о в к и . ***Обґрунтовано та запропоновано теоретичні й прикладні підходи до моделювання гідрогеологічних процесів в умовах урбанізованих територій. Отримані результати підтверджують доцільність застосування запропонованого інтегрованого підходу для оптимізації практичного використання детермінованого методу кінцевих різниць у моделюванні підземних вод за даними інженерно-геологічних вишукувань. Запропонована методика суттєво підвищує надійність і ефективність детермінованих геофільтраційних моделей.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***підземні води, гідрогеологічне моделювання, інженерно-геологічні вишукування, Processing MODFLOW, Darcy Flow, ArcGIS.***

Вступ

Будівництво на території міст, зокрема Києва, нині здебільшого ведеться у складних інженерно-геологічних умовах. Спорудження цивільних, промислових та інфраструктурних об'єктів за існуючої щільної забудови території має ряд особливостей. Активне освоєння підземного міського простору порушує природний гідрогеологічній режим. Штучні перешкоди на шляху руху ґрунтових вод спричинюють підйом їх рівня. В результаті можуть активізуватися існуючі небезпечні інженерно-геологічні процеси та набути розвитку нові. Такі процеси впливають не лише на умови нового будівництва, але й часто призводять до часткового руйнування існуючих будинків, що потрапили у зону впливу об'єкта будівництва (Рудько, & Яковлєв, 2020).

Вважається, що гідрогеологічне моделювання є найбільш дієвим і достовірним засобом, що застосовується при вивченні та прогнозуванні гідрогеологічних процесів. Тому для врахування закономірностей формування, розподілу та руху підземних вод на ділянках ущільненої забудови найбільш доцільно проводити моделювання процесів геофільтрації (Holzbecher, 2013; Vijay, & Singh, 2018; Wang, Pachocka, & Jackson, 2014).

Відомі такі методи гідрогеологічного моделювання: натурне, фізичне і математичне (Кошляков, 2003). У свою чергу, методи математичного моделювання включають балансовий, математико-статистичний та детермінований методи. З погляду достовірності прогнозування розвитку гідрогеологічних процесів у просторі і часі під впливом природних та антропогенних чинників найбільший інтерес становить детермінований метод.

Математичне моделювання потоку ґрунтових вод за запропонованою авторами схемою дає змогу, з одного боку, уникнути зайвої схематизації природних гідрогеологічних умов, а з другого – врахувати складнощі і різноманіття граничних умов ґрунтового потоку, дати більш об'єктивну оцінку впливу пов'язаних із будівництвом інженерних заходів на гідрогеологічні умови території. Водночас це забезпечить достовірність інженерних розрахунків захисних споруд та оптимізацію їх можливих варіантів вибору.

© Кошляков Олексій, Диняк Оксана, Кошлякова Ірина, 2026

ISSN 1728-3817

Методи

По своїй суті детермінований метод гідрогеологічного моделювання зводиться переважно до наближеного розв'язку рівняння математичної фізики параболічного типу, що описує той чи інший гідрогеологічний процес (рух рідини, перенесення речовини або тепла підземними водами тощо) за допомогою одного з чисельних методів (найчастіше використовується метод скінчених різниць). Чисельні методи розв'язку реалізуються за допомогою відповідних спеціально розроблених програмних комплексів. Зокрема, для реалізації методу скінчених різниць при гідрогеологічному моделюванні найчастіше застосовують відомий програмний комплекс Processing Modflow.

Активно досліджуються питання практичної інтеграції спеціалізованих засобі гідрогеологічного моделювання та сучасних ГІС. Вивчаються проблеми переходу від концептуальної гідрогеологічної моделі до числової, створення інструментів для автоматизації побудови обчислювальних сіток тощо. Запропоновано концепцію інтеграції ГІС з числовими моделями підземних вод, що дозволяє зберегти гнучкість обох систем (Alcaraz et al., 2017). Розроблена низка практичних рішень для інтеграції, наприклад панель GIS-PMWIN для зв'язку ArcGIS з Processing Modflow (Lin, & Lin, 2014), плагін FREEWAT для QGIS (Perdikaki et al., 2020).

Прийнято виділяти послідовні стадії детермінованого гідрогеологічного моделювання: створення за наявними фактичними даними гідрогеологічної моделі (переважно в картографічному вигляді), створення на основі гідрогеологічної моделі власне математичної гідрогеологічної моделі, епігнозне математичне моделювання для обґрунтування та коригування математичної моделі (розв'язок так званої оберненої задачі), власне математичне гідрогеологічне моделювання для прогнозування розвитку гідрогеологічних процесів. Найбільші складності при цьому виникають при обґрунтуванні та коригуванні математичної моделі конкретного об'єкта, яка повинна найбільш повно відображати природні і штучні особливості, що притаманні об'єкту.

Обґрунтування та коригування математичної моделі по суті є процесом розв'язання так званої оберненої задачі як її розуміють у гідрогеології. В математиці прийнято розрізняти інверсну (визначення параметрів рівняння), обернену (визначення крайових умов задачі) та індуктивну (визначення рівняння, що описує процес) задачу. Але в гідрогеології такий поділ на інверсні, обернені та індуктивні задачі є досить умовним при практичному застосуванні, тому всі ці задачі разом називають оберненою задачею.

За визначенням обернена задача завжди є некоректною. Тому ключову роль у підвищенні точності прогнозного гідрогеологічного моделюванні відіграє достовірне визначення шуканої функції на стадії епігнозного моделювання. Наприклад, при моделюванні геофільтрації це означає максимально точне відтворення поверхні гідродинамічного напору потоку підземних вод при епігнозному моделюванні. Корегування поверхні гідродинамічного напору відбувається переважно шляхом варіювання значень геофільтраційних параметрів шарів гірських порід та інтенсивності інфільтраційного живлення або величини перетікання в межах геологічно зумовлених значень таким чином, щоб натурні значення напору (які реально зафіксовані в натурі) збігалися з модельними у тих самих точках із врахуванням існуючої похибки фактичних вимірювань. Отже критерієм точності такого відтворення зазвичай виступає збіг натурних і модельних результатів визначення гідродинамічного напору в обмеженій кількості точок, що відповідають наявним свердловинам, колодязям або шурфам. Водночас достовірність загального просторового розташування поверхні гідродинамічного напору зазвичай детально не аналізується. Відповідно знижується достовірність обґрунтування прийнятих для подальшого прогнозного моделювання параметрів геофільтрації, що позначається на точності визначення прогнозної поверхні гідродинамічного напору. (Dyniak, Koshliakov, & Koshliakova, 2023). Останнім часом це питання набуває актуальності при моделюванні потоків підземних вод на урбанізованих територіях, зокрема у зв'язку з необхідністю визначенням площ можливих ділянок підтоплення території, витрат потоку підземних вод, підвищеними вимогами до точності інженерних розрахунків та оцінкою ризиків (Bailey et al., 2025; Husna et al., 2023; Macdonald et al., 2012; Mirlas et al., 2025).

Саме тому для підвищення достовірності просторового розташування поверхні гідродинамічного напору доцільним є використання іншого, максимально незалежного від власне гідрогеологічного моделювання інструменту для відтворення поверхні напору. Причому такий інструмент повинен бути не "чисто математичним" (як, наприклад, апроксимація), а враховувати уявлення про специфіку процесу руху підземних вод.

У випадку, коли розглядається рух ґрунтових вод (підземних вод з вільною поверхнею або першого від поверхні землі постійного водоносного горизонту), автори рекомендують використовувати відомий стандартний модуль Darcy Flow програмного комплексу ArcGIS. Модуль Darcy Flow реалізує по суті балансовий, а не детермінований метод гідрогеологічного моделювання поверхні гідродинамічного напору на основі аналітичного розрахунку руху потоку підземних вод на основі відомого закону Дарсі. (Кошляков та ін., 2019).

Ідея полягає в тому, щоб спочатку максимально достовірно на основі балансового методу відтворити поверхню ґрунтових вод за допомогою модуля Darcy Flow в середовищі ArcGIS на основі наявних фактичних даних (рівень ґрунтових вод у свердловинах, колодязях тощо). Потім саме цю відтворену поверхню слід використати для корегування значень геофільтраційних параметрів товщі, інтенсивності інфільтраційного живлення потоку ґрунтових вод або величини перетікання при розв'язанні оберненої задачі на стадії епігнозного моделювання (Dyniak, Koshliakov, & Koshliakova, 2025). Слід підкреслити, що при відтворенні поверхні ґрунтових вод на урбанізованих територіях автори вважають за доцільне використати всі чисельні архівні фактичні дані про стан рівнів на території досліджень за попередні роки, а не лише ті, що отримані в процесі останніх вишукувань. Зрозуміло, що такий підхід вимагає ретельного змістовного аналізу якісних та кількісних змін природних та антропогенних чинників (зокрема, водогосподарської обстановки), що формують поверхню ґрунтових вод, точності вимірювань рівнів, похибки висотної і площинної прив'язки точок спостережень тощо.

Результати

Автори застосували саме такий підхід при прогнозуванні змін гідродинаміки потоку ґрунтових вод під впливом будівництва на території м. Києва в межах будівельного майданчика та на прилеглій території з метою подальшої оцінки баражного ефекту, що виникає під дією поля глибоко занурених паль (рис. 1).

Ґрунтові води тут містяться у водно-льодовикових відкладах середньо – верхньочетвертинного віку,

представлених пісками, супісками, супісками запісковаными, суглинками з прошарками піску. За даними інженерно-геологічних вишукувань водоносні породи можна вважати відносно однорідними у фільтраційному відношенні. Відносно водотривкими породами вважаються еоценові мергелі, частково суглинки. Особливістю є те, що внаслідок розмиву талими водами у час середньочетвертинного дніпровського покривного зледеніння сформувалась складна поверхня водотриву ґрунтових вод, яка за формою повторює поверхню рельєфу (рис. 2). Живлення ґрунтових вод відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та вод антропогенного походження.

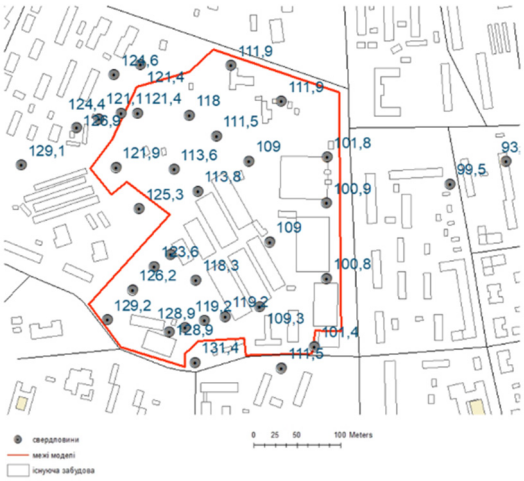


Рис. 1. Схема будівельного майданчика

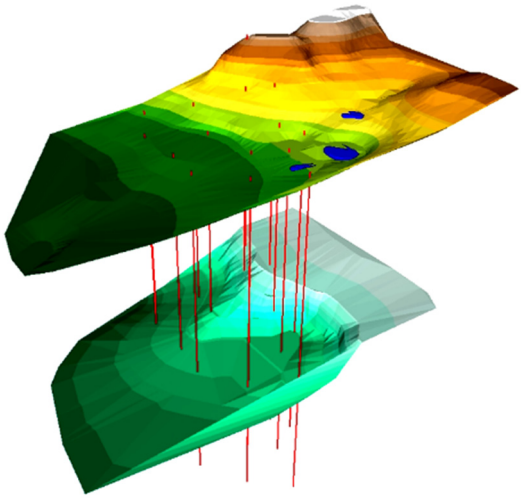


Рис. 2. Тримірне зображення поверхонь рельєфу та водотриву ґрунтових вод

На першому етапі, використовуючи дані інженерно-геологічних вишукувань (відмітки рівня ґрунтових вод, геометрія шарів ґрунту, лабораторні визначення на зразках пористості ґрунту, коефіцієнту фільтрації, коефіцієнта водовіддачі), у середовищі ArcGis за допомогою модуля Darcy Flow та використання локально-детермінованих методів інтерполяції було отримано поверхню рівня ґрунтових вод (рис. 3).

Далі було проаналізовано параметри пористості та водопроникності ґрунтової товщі, визначено баланс ґрунтових вод, отримано картосхему напрямку потоку ґрунтових вод та визначено його загальний тренд (рис. 4).

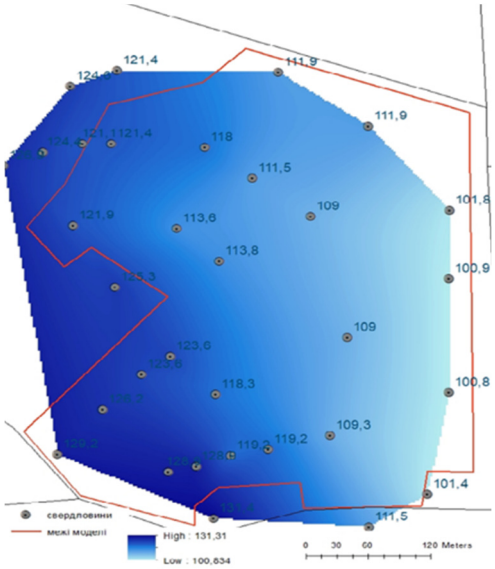


Рис. 3. Поверхня рівня ґрунтових вод у середовищі ArcGis

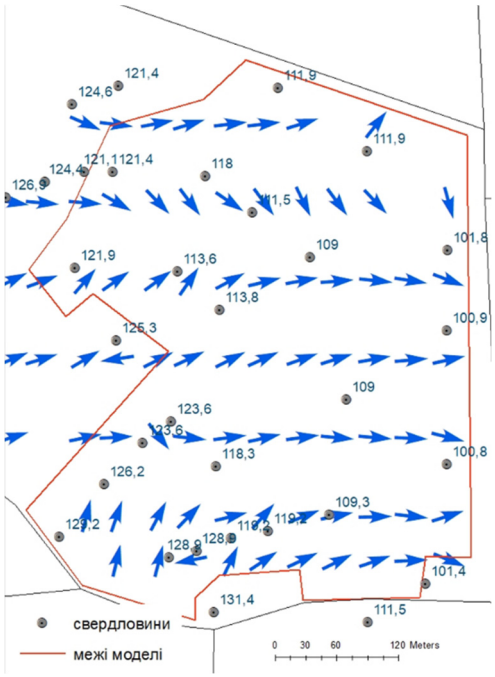


Рис. 4. Картосхема напрямку потоку ґрунтових вод

На другому етапі отриману інформацію було використанао як еталонну при створенні та коригуванні геофільтраційної детермінованої моделі, що реалізує метод скінчених різниць (на стадії епігнозного моделювання) за допомогою програмного комплексу Processing Modflow. Для відображення гідрогеологічних умов з найменшим ступенем схематизації розміри розрахункових блоків моделі приймалися 10х10 м. Така модель, на думку авторів, дала змогу достатньо точно охарактеризувати умови формування і руху ґрунтових вод. Коригування геофільтраційних параметрів моделі та інтенсивності інфільтраційного живлення виконувалось таким чином, щоб розрахункові значення рівня ґрунтових вод максимально збігалися з фактичними, які фіксувались в інженерно-геологічних свердловинах, а напрямок потоку та його загальний тренд відповідали даним, отриманим на першому етапі в середовищі ArcGis за допомогою модуля Darcy Flow.

ISSN 1728-3817

Далі було виконано порівняння отриманої за допомогою комплексу Processing Modflow поверхні рівня ґрунтових вод з результатом, отриманим раніше в середовищі ArcGis за допомогою модуля Darcy Flow. Результати порівняння наведено на рис. 5.



Рис. 5. Порівняння ізолінійних поверхонь рівня ґрунтових вод, отриманих за допомогою модуля Darcy Flow в середовищі ArcGis та комплексу Processing Modflow

Дискусія і висновки

В результаті можна зробити такі висновки.

1. Відмінність між отриманими поверхнями для розглянутого об'єкта дорівнює 0,2 м, що становить приблизно 10 % від можливої очікуваної максимальної похибки фактичного визначення рівня ґрунтових вод у свердловинах.

2. Створена таким шляхом геофільтраційна детермінована модель, що реалізує метод скінчених різниць, достатньо точно відповідає реальним умовам, тому може бути використана при прогнозному моделюванні потоку ґрунтових вод у межах будівельного майданчика та на прилеглій території, зокрема з метою подальшої оцінки баражного ефекту.

3. Спільне застосування модулю Darcy Flow в середовищі ArcGis і програмного комплексу Processing Modflow дозволяє суттєво оптимізувати процес практичного застосування детермінованого методу скінчених різниць при моделюванні потоків ґрунтових вод із використанням даних інженерно-геологічних вишукувань та підвищити достовірність геофільтраційної детермінованої моделі.

4. У випадку, коли практична задача зводиться лише до відтворення фактичної поверхні ґрунтових вод, а не для прогнозування її змін під впливом природних і антропогенних чинників, з погляду витрат часу і фінансових ресурсів, перевагу слід надати модулю Darcy Flow та використанню локально-детермінованих методів інтерполяції в середовищі ArcGis порівняно з реалізацією детермінованого методу скінчених різниць.

Внесок авторів: Олексій Кошляков – концептуалізація, методологія, написання (оригінальна чернетка). Оксана Диняк – створення моделей, написання (перегляд і редагування). Ірина Кошлякова – формальний аналіз, валідація даних.

Джерела фінансування. Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи № 25КП049-03.

Список використаних джерел

Кошляков, О. Є. (2003). *Гідрогеологічне моделювання*. ВПЦ "Київський університет".

Кошляков, О., Диняк, О., Чомко, Д., & Кошлякова, І. (2019). Врахування закономірностей формування, розподілу та впливу підземних вод з метою обґрунтування прогнозної гідрогеологічної моделі на ділянках ущільненої міської забудови. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(87), 96–99. https://doi.org/10.17721/1728-2713.87.14

Рудько, Г. І., & Яковлєв, Є. О. (2020). Сучасні чинники регіональних граничних змін інженерно-геологічних умов України. *Мінеральні ресурси України*, 1, 15-26. https://doi.org/10.31996/mru.2020.1.15-26

Alcaraz, M., Vázquez-Suñé, E., Velasco, V., & Criollo, R. (2017). A loosely coupled GIS and hydrogeological modeling framework. *Environmental Earth Sciences*, 76(10), 382. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6688-2

Bailey, R., Abbas, S., Arnold, J., & White, M. (2025). SWAT+MODFLOW: a new hydrologic model for simulating surface-subsurface flow in managed watersheds. *Geoscientific Model Development*, 18, 5681–5697. https://doi.org/10.5194/gmd-18-5681-2025

Dyniak, O., Koshliakov, O., & Koshliakova, I. (2023). Application of spatial analysis and modeling in GIS in the implementation of the water balance method in the hydrogeological monitoring system. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520152

Dyniak, O., Koshliakov, O., & Koshliakova, I. (2025). Experience in Optimizing the Process of Practical Application of Mathematical Modeling of Groundwater Flows. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2025, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510137

Holzbecher, E. (2013). *Aquifer Physics Modes for Hydrogeological Modeling. Application of the COMSOL Physics Builder*. COMSOL Conference, Rotterdam.

Husna, A., Akmalia, R., Wira Rohmat, F., Wira Rohmat, I., Rohmat, D., Wijayasari, W., Alvando, P., & Wijaya, A. (2023). Groundwater Sustainability Assessment against the Population Growth Using a MODFLOW Groundwater Model (Bima City, Indonesia). *Water*, 15(24), 1–16. https://doi.org/10.3390/w15244262

Lin, H. T., & Lin, L. (2014). The development of GIS-PMWIN and its application for mine-water modelling in the Far West Rand, South Africa. *Water SA*, 40(2), 313-322. https://doi.org/10.4314/wsa.v40i2.13

Macdonald, D., Dixon, A., Newell, A., & Hallaways, A. (2012). Groundwater flooding within an urbanised flood plain. *Journal of Flood Risk Management*, 5(1), 68–80. https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01127.x

Mirlas, V., Zhakyp, A., Auelkhan, Ye., & AnkerMirlas, Ya. (2025). Assessment of urbanization-related groundwater flooding process via Visual MODFLOW modeling: A case study for the northern part of Almaty city, Kazakhstan. *Journal of Flood Risk Management*, 18, 1–20. https://doi.org/10.1111/jfr3.13029

Perdikaki, M., Criollo Manjarrez, R., Pouliaris, C., Rossetto, R., & Kallioras, A. (2020). Free and open-source GIS-integrated hydrogeological analysis tool: an application. *Environmental Earth Sciences*, 79(348). https://doi.org/10.1007/s12665-020-09092-2

Vijay, P., & Singh, V. (2018). Hydrologic modeling: progress and future directions. *Geoscience Letters*, 5(15). https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z

Wang, L., Pachocka, M., & Jackson, C. R. (2014). *User's manual for BGS GISGroundwater: a numerical model to simulate groundwater levels for ArcGIS10.0*. British Geological Survey Open Report, OR/12/063. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19875/

References

Alcaraz, M., Vázquez-Suñé, E., Velasco, V., & Criollo, R. (2017). A loosely coupled GIS and hydrogeological modeling framework. *Environmental Earth Sciences*, 76(10), 382. https://doi.org/10.1007/s12665-017-6688-2

Bailey, R., Abbas, S., Arnold, J., & White, M. (2025). SWAT+MODFLOW: a new hydrologic model for simulating surface-subsurface flow in managed watersheds. *Geoscientific Model Development*, 18, 5681–5697. https://doi.org/10.5194/gmd-18-5681-2025

Dyniak, O., Koshliakov, O., & Koshliakova, I. (2023). Application of spatial analysis and modeling in GIS in the implementation of the water balance method in the hydrogeological monitoring system. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520152

Dyniak, O., Koshliakov, O., & Koshliakova, I. (2025). Experience in Optimizing the Process of Practical Application of Mathematical Modeling of Groundwater Flows. *18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2025, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510137

Holzbecher, E. (2013). *Aquifer Physics Modes for Hydrogeological Modeling. Application of the COMSOL Physics Builder*. COMSOL Conference, Rotterdam.

Husna, A., Akmalia, R., Wira Rohmat, F., Wira Rohmat, I., Rohmat, D., Wijayasari, W., Alvando, P., & Wijaya, A. (2023). Groundwater Sustainability Assessment against the Population Growth Using a MODFLOW Groundwater Model (Bima City, Indonesia). *Water*, 15(24), 1–16. https://doi.org/10.3390/w15244262

Koshliakov, O. (2003). *Hydrogeological modeling*. "Kyiv University" [in Ukrainian].

Koshliakov, O., Dyniak, O., Chomko, D., & Koshliakova, I. (2019). The study of the laws of formation, distribution, and influence of groundwater to justify substantiate the predicted hydrogeological model at the urban compacted area. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(87), 96–99 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.87.14

Lin, H. T., & Lin, L. (2014). The development of GIS-PMWIN and its application for mine-water modelling in the Far West Rand, South Africa. *Water SA*, 40(2), 313–322. https://doi.org/10.4314/wsa.v40i2.13

Macdonald, D., Dixon, A., Newell, A., & Hallaways, A. (2012). Groundwater flooding within an urbanised flood plain. *Journal of Flood Risk Management*, 5(1), 68–80. https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01127.x

Mirlas, V., Zhakyp, A., Auelkhan, Ye., & AnkerMirlas, Ya. (2025). Assessment of urbanization-related groundwater flooding process via Visual MODFLOW modeling: A case study for the northern part of Almaty city, Kazakhstan. *Journal of Flood Risk Management*, 18, 1–20. https://doi.org/10.1111/jfr3.13029

Perdikaki, M., Criollo Manjarrez, R., Pouliaris, C., Rossetto, R., & Kallioras, A. (2020). Free and open-source GIS-integrated hydrogeological analysis tool: an application. *Environmental Earth Sciences*, *79*(348). https://doi.org/10.1007/s12665-020-09092-2

Rudko, H. I., & Yakovlev, Y. O. (2020). Modern factories of regional engineering-geological conditions of Ukraine changes. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 15–26 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31996/mru.2020.1.15-26

Vijay, P., & Singh, V. (2018). Hydrologic modeling: progress and future directions. *Geoscience Letters*, 5(15). https://doi.org/10.1186/s40562-018-0113-z

Wang, L., Pachocka, M., & Jackson, C. R. (2014). *User's manual for BGS GISGroundwater: a numerical model to simulate groundwater levels for ArcGIS10.0*. British Geological Survey Open Report, OR/12/063. https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19875/

Отримано редакцією журналу / Received: 26.01.26
Прорецензовано / Revised: 27.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Oleksii KOSHLIAKOV, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-3090-4855
e-mail: akoshliakov57@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Oksana DYNIAK, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7147-0769
e-mail: dyniak_o_v@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Iryna KOSHLIAKOVA, Engineer
ORCID ID: 0000-0002-2293-8441
e-mail: iryna.koshliakova@knu.ua
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

CURRENT APPROACHES TO MODELING GEOFILTRATION IN URBAN AREAS

Background. ***The purpose of the study is to develop theoretical concepts and applied approaches to modeling hydrogeological processes in space and time under the influence of natural and anthropogenic factors.***

Methods. ***Hydrogeological modeling is one of the most effective and reliable tools for studying and predicting underground flow processes. Among numerical methods, the finite difference method, implemented in the well-known Processing MODFLOW software package, is most often used. Accurate determination of hydrodynamic pressures at the epignosis modeling stage is key to improving the accuracy of predictive calculations. To refine the geofiltration parameters of aquifers and the intensity of infiltration recharge, it is necessary to adjust the surface of the hydrodynamic head. Accuracy of parameters can be achieved when the model head values agree with actual measurements within the acceptable error range. To improve the reliability of the spatial position of the hydrodynamic head surface, it is proposed to use a tool independent of hydrogeological modeling – the Darcy Flow module in ArcGIS – to reproduce the head surface before the calibration stage.***

Results. ***The proposed approach was tested on the example of a residential area in Kyiv. The direction and general trend of the underground flow, determined at the first stage in ArcGIS using the Darcy Flow module, were used to calibrate the geofiltration parameters of the model and the intensity of infiltration recharge by comparing the calculated groundwater levels with actual observation data. The high degree of agreement between the field and model results for determining the hydrodynamic head at selected points confirms the reliability and accuracy of the modeling results. The calculations prove the effectiveness of the combined use of the Darcy Flow module (ArcGIS) and the Processing MODFLOW software package for hydrogeological analysis.***

Conclusions. ***Theoretical and applied approaches to modeling hydrogeological processes in urbanized areas have been substantiated and proposed. The results confirm the feasibility of applying the proposed integrated approach to optimize the practical use of the deterministic finite difference method in groundwater modeling based on engineering and geological survey data. The proposed methodology significantly improves the reliability and efficiency of deterministic geofiltration models.***

Keywords: ***groundwater, hydrogeological modeling, engineering-geological surveys, Processing MODFLOW, Darcy Flow, ArcGIS.***

Олексій Кошляков є членом редколегії видання, тому не брав участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті.

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.

Oleksii Koshliakov is the a member of the journal editorial board, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article.

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 556
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.11

Movlud TEYMUROV[1], PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0008-2038-2321
e-mail: movlud_teymurov@yahoo.com

Emil JABRAYILOV[1], Researcher
ORCID ID: 0000-0001-9391-4319
e-mail: emil.jabrayilov@gmail.com

Afag HAJIYEVA[2], PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-9813-7835
e-mail: afag_hajiyeva@unec.edu.az

[1]Institute of Geography, Ministry of Science and Education, Baku, Azerbaijan
[2]Azerbaijan State University of Economics (UNEC), Baku, Azerbaijan

THE INFLUENCE OF LAND COVER AND GEOLOGICAL STRUCTURE ON THE NATURAL REGULATION OF RIVER RUNOFF

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геогр. наук, проф. Д.О. Ляшенком)

Background. *In arid and semi-arid regions like the Karabakh region of Azerbaijan, the efficient management of scarce water resources is critically dependent on the natural regulation of river runoff. This process, which ensures a more balanced intra-annual distribution of water, is traditionally understood to be influenced by climate and surface cover. However, the specific role of underlying geological structures has often been assessed only indirectly, presenting a significant research challenge. This study investigates the impact of both geological formations and surface cover characteristics on the natural runoff regulation of rivers from 1999 to 2024, a period marked by climatic changes and significant landscape alterations.*

Methods. *An integrated approach combining hydrometeorological data, remote sensing, and GIS technologies was employed. The study utilized long-term climate data (precipitation, temperature, etc.), satellite imagery (Landsat), and a digital elevation model. Key methodologies included the application of the NRCS-CN (Natural Resources Conservation Service Curve Number) method and the calculation of a "natural regulation ratio" (NRR), defined as the ratio of baseflow (Qu) to surface runoff (Qs). Hydrologic Soil Groups (HSGs) and various indices (NDVI for vegetation cover, BSI for bare soil) were analyzed to characterize land use/land cover (LULC) and its changes. The analysis focused on comparing river basins with similar climatic and morphometric characteristics but differing geologies.*

Results. *The study confirmed that geological structure is a key factor in the rivers feeding. Rivers flowing through the highly water permeable, fractured volcanic rocks of the Karabakh Plateau exhibited high NRR values (often above 1.0), with baseflow (groundwater flow shares) exceeding 50 %. In contrast, rivers in the south, underlain by impermeable rocks, showed very low NRR, with surface runoff dominating (70–90 % of rivers total flow). Overall, the regional average NRR was 0.97, indicating a near-equal balance between surface and subsurface flow sources. However, a negative trend was observed: over the 25-year period, landscape changes driven by aridification and reduced vegetation cover led to surface consolidation. This caused a 11.4 % decrease in initial abstraction parameter (flow-forming potential of precipitation) and a 4.79 % decline in the regional NRR, signaling a reduction in natural regulatory capacity.*

Conclusions. *The findings conclusively demonstrate that the geological foundation is a decisive controller on the natural regulation of river flow in arid regions. The presence of fractured, permeable rocks facilitates high infiltration and substantial subsurface flow, creating a natural reservoir that ensures water availability during dry periods. Consequently, assessing the geological context is essential for effective water resource management planning. The identified decline in the natural regulation ratio underscores the vulnerability of these water systems to ongoing climate change and land degradation. For rivers with inherently low regulation, artificial measures like reservoir construction remain necessary. This study provides a critical framework for prioritizing water management strategies based on a basin's specific hydro-geological characteristics.*

Keywords: geological structure, land cover, river runoff regulation, baseflow, infiltration rate, initial abstraction.

Background

Global climate change and anthropogenic pressures are leading to a progressive decline in the world's freshwater resources (Mishra, 2023; Sivakumar, 2011). This necessitates more efficient utilization and continuous assessment of these vital supplies. A more acute reduction in river water resources is observed in arid and semi-arid regions (Wang et al., 2024), including the Republic of Azerbaijan, where river flow constitutes the primary source of water reserves. In arid regions, the scarcity of water is compounded by the intra-annual uneven distribution of river discharge, which creates additional challenges (El Kenawy, 2024). For instance, during the spring months when rivers experience their highest discharge, water demand is relatively low, and a significant volume of water often flows unused without being stored. Conversely, the peak water demand occurs during the summer irrigation season. However, during this critical period, water scarcity emerges in the majority of rivers, with many even drying up completely (Ministry of Ecology of Azerbaijan, 2021). Therefore, the regulation of river flow is of paramount importance for the integrated management of water resources (Ciampittiello, Marchetto, & Boggero, 2024).

The regulation of river flow, meaning the relatively even distribution of discharge throughout the year, is a very important factor for the efficient use of their resources (Nilsson et al., 2005). In Azerbaijan, the most extensive consumer sector for river water is agriculture. Approximately 70–75 % of river water is used for irrigation farming. However, during the intensive irrigation period (June-August), only a small portion (15–21 %) of the annual flow of most rivers occurs. In the spring months, a much larger share of the flow, often 25–45 %, is utilized. Another negative trend observed over the last 20 years is the overall

© Teymurov Movlud, Jabrayilov Emil Hajiyeva Afag, 2026

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

decrease in precipitation and runoff during the warm months (spring–summer) by up to 2.5–4 % relative to the annual indicator (Makhmudov et al., 2024).

Consequently, a significant disparity arises between river discharge and water demand during the consumption period in arid regions. This necessitates additional interventions to regulate river flow. The most viable approach for managing river water is the artificial regulation of flow through the construction of on-stream or off-stream reservoirs (Tonkin, & Death, 2014). However, the construction of reservoirs not only requires substantial financial investment but can also lead to land submergence, salinization, and other ecogeographical issues. Therefore, the parallel assessment of the natural regulation of river flow is a highly important procedure from both ecological and economic perspectives.

The primary indicator of natural river flow regulation is a high proportion of groundwater in their recharge (Wang et al., 2015). In rivers predominantly fed by surface waters (rain and snow), the intra-annual distribution of flow exhibits considerable variation. During spring and autumn, when water demand is low, 60–70 % of the river's annual discharge can occur. Furthermore, this flow is primarily formed from surface (rain and snowmelt) sources. Conversely, a higher share of groundwater contribution leads to a more naturally balanced distribution of flow throughout the year. The role of groundwater in river discharge is manifested primarily in its natural regulatory function, whereby it acts as a source of sustenance for the river during dry periods. This creates favorable conditions for the utilization of water resources in arid agricultural regions where water demand is high.

Our research has determined that the geological structure of a territory is a fundamental factor in the natural regulation of river flow. Rivers within basins dominated by fractured and porous rocks exhibit a high degree of natural regulation. Conversely, the impermeability of the surface cover plays a negative role in flow regulation. Specifically, in areas with rich vegetation, the high water retention capacity activates infiltration processes, thereby increasing the natural regulation of the flow. In contrast, climate aridification reduces vegetation density and accelerates land degradation, which in turn increases surface impermeability. Against a backdrop of declining precipitation, this conditions the conversion of rainfall primarily into surface runoff. Consequently, a weakening of infiltration and the natural regulation process is observed.

The assessment of natural flow regulation holds significant economic and ecogeographical importance. It can yield effective results not only for the efficient use of river water resources but also for the preservation of ecological flow, agroclimatology, the determination of irrigation norms, the construction of reservoirs, and other related fields. Monitoring of main environmental components affecting rivers groundwater feeding in the Karabakh region of Azerbaijan allows assessing changes in the volume of water resources and contributes to the prevention of emergencies. The results obtained are also effective in terms of more efficient use of water resources, especially in terms of meeting the needs of irrigated agriculture, which is the main area of water consumption in the Karabakh region.

Methods

The research methodology accounted for the influence of the primary components shaping the land (soil) cover in the study area. Input data were collected from satellite imagery, a digital elevation model (DEM), and hydrometeorological observation data spanning the period 1999–2024. For areas lacking direct observation stations, climate and river flow data were reconstructed using interpolation, inverse distance weighting, and spatial analogy techniques (Makhmudov, & Teymurov, 2024).

The hypsometric characteristics of the territory – including elevation, slope degree, and aspect – were analyzed using the DEM. Morphometric indicators, such as river lengths, basin areas, flow direction, horizontal and vertical surface fragmentation, and river network density, were derived using the Surface, Density, and Hydrology toolkits within ArcGIS software.

Fragments of Landsat-7 and Landsat-8 multispectral satellite imagery were used to classify different landscape types, soil-vegetation cover, and moisture conditions. Vegetation indices (NDVI, SAVI) and the built-up index (NDBI) were applied to the predominant land use and land cover (LULC) types within the river basin to determine vegetation cover density (Rianti, & Sari, 2024).

Soil cover analysis was conducted by integrating normalized difference soil indices, specifically the Bare Soil Index (BSI) and a normalized difference index for soil erosion (NDBal). These indices are critical for determining the level of soil degradation (Mammadov et al., 2025; Nguyen et al., 2021).

Furthermore, The National Atlas of the Republic of Azerbaijan was referenced for data on the soil's granular composition and the geological structure of the study area (National Atlas of the Republic of Azerbaijan, 2014).

To assess the heat-moisture regime of the area, several indices were analyzed, including the Normalized Difference Water Index (NDWI), the Normalized Difference Moisture Index (NDMI), the Normalized Difference Drought Index (NDDI), and Land Surface Temperature (LST).

The research methodology incorporated the scientific and theoretical foundations of several leading global hydro-pedological methods for studying land cover. Specifically, the Ponce-Shetty, Lvovich, SCS-CN, and Rational methods were employed (Gnann, Woods, & Howden, 2019; Hawkins et al., 2020; Lvovich, 1974; Wang, Liu, & Yang, 2012).

The Rational Method and the NRCS-CN (Natural Resources Conservation Service Curve Number) method are considered among the most popular and effective approaches for assessing soil-water relationships in a given area (Makhmudov et al., 2025).

The Rational Method is widely used to estimate the rate of precipitation conversion into surface runoff. Rational (surface) runoff coefficients are variable quantities, influenced by a range of runoff-forming factors. Key determinants often include precipitation intensity, basin area and slope, various landscape types, and soil infiltration coefficients.

The NRCS-CN method is a fundamental model applied to estimate both surface runoff and infiltration levels. The methodology incorporates several critical parameters for analyzing the influence of an area's geological structure on runoff formation. These include initial abstraction, soil moisture content, maximum soil retention, Hydrologic Soil Groups (HSGs), and other components.

1) ***Maximum Soil Retention (S, mm)*** represents the soil's maximum water retention capacity under specific physio-geographical conditions. The relationship between this parameter, precipitation (P, mm), and surface runoff (Q, mm) is expressed as:

$$S = 5 \times [\, P+2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{1/2} \,] \qquad (1)$$

2) ***Initial Abstraction (Ia, mm)*** *i*s the portion of rainfall lost before runoff begins, primarily to soil wetting. In other words, it is the volume of water from a rainfall event consumed by losses such as infiltration, evaporation, interception by

vegetation, and depression storage, which does not contribute to surface flow (Teymurov, 2022). This parameter is functionally related to the maximum retention (S) by:

$$Ia = \lambda S \quad (2)$$

Here, **λ** is an abstraction coefficient, a variable quantity that is inversely proportional to the antecedent moisture condition.

3) ***Actual Soil Moisture Content (F, mm)*** is the actual volume of water stored in the soil under current conditions. It is calculated using the water balance equation:

$$F = P - Q - Ia \quad (3)$$

4) ***Hydrologic Soil Groups (HSGs)*** are a classification system that indicates a soil's potential to generate surface runoff based on its infiltration capacity and granular composition. According to the USDA-NRCS classification, soils are categorized into four main groups (A, B, C, D). There is a clear tendency for infiltration rates to decrease and surface runoff potential to increase from group A (lowest runoff potential) to group D (highest runoff potential) (Nielsen, & Hjelmfelt, 1998; Ross et al., 2018).

The study of HSGs within the process of assessing infiltration and flow regulation allows for obtaining more effective and accurate results.

For the delineation of HSGs, the ***Soil Texture Triangle*** is applied, defining twelve distinct soil codes based on mechanical composition: sand (S), loamy sand (LS), sandy loam (SL), loam (L), silty loam (SiL), silty (Si), sandy clay loam (SCL), clay loam (CL), silty clay loam (SiCL), sandy clay (SC), silty clay (SiC), and clay (C).

Given that infiltration is primarily governed by the relative proportions of sand and clay, their percentages serve as the key transitional criteria between these soil codes and the broader HSGs. The classification is as follows: ***Group A:*** Sand > 50 %, Clay: 0–10 %; ***Group B:*** Sand: 20–50 %, Clay: 10–20 %; ***Group C:*** Sand: 40–60 %, Clay: 20–40 %; ***Group D:*** Sand: 20–30 %, Clay: 40–60 % (Dewangan et al., 2023).

Table 1 (USDA, & NRCS, 2009) presents key hydrogeological characteristics for the different soil mechanical composition codes according to this classification system.

Another important aspect included in the USDA soil classification is the estimation of the infiltration capacity of soils based on their granular texture, different slope degree, and moisture content (Table 2).

Table 1

Hydrogeological characteristics of hydrologic soil groups (HSGs) (USDA-NRCS classification)

HSGs	Soil codes	Porosity, %	Infiltration level	
			mm/hr	Rate
A	S, LS, SL	43.7–45.3	> 7.62	Very high
B	SiL, L	46.3–50.1	3.81–7.62	High
C	Si, SCL	39.8–48.2	1.27–3.81	Moderate
D	SiCL, CL, SC, SiC, C	43.0–47.9	0.00–1.27	Low

Table 2

Changes in infiltration capacity depending on the granulometric composition of soils

Soil texture types	Percent of slope				
	0–4 %	5–8 %	8–12 %	12–16 %	Over 16 %
	Infiltration rate, inches/hour				
Coarse Sand	1.25	1.00	0.75	0.50	0.31
Medium Sand	1.06	0.85	0.64	0.42	0.27
Fine Sand	0.94	0.75	0.56	0.38	0.24
Loamy Sand	0.88	0.70	0.53	0.35	0.22
Sandy Loam	0.75	0.60	0.45	0.30	0.19
Fine Sandy Loam	0.63	0.50	0.38	0.25	0.16
Loam	0.54	0.43	0.33	0.22	0.14
Silt Loam	0.50	0.40	0.30	0.20	0.13
Silt	0.44	0.35	0.26	0.18	0.11
Sandy Clay	0.31	0.25	0.19	0.12	0.08
Clay Loam	0.25	0.20	0.15	0.10	0.06
Silty Clay	0.19	0.15	0.11	0.08	0.05
Clay	0.13	0.10	0.08	0.05	0.03

Results

Investigating the influence of an area's geological structure on runoff formation is considered one of the most challenging research areas compared to other factors. In traditional studies, the impact of geological structure on the water balance was assessed only indirectly (Rustamov, & Kashkay, 1978). The most original research method for studying this influence involved comparing rivers with minimal differences in their formative climatic and other physio-geographical factors, as well as the morphometric indicators of their basins, but with significant differences in their flow quantities. A comparison of the flow quantities of two river basins (the Zabukh and Shamkir rivers) located in the Karabakh region, which have approximately similar physio-geographical and morphometric characteristics, was conducted and is presented in Table 3.

Table 3

Comparison of selected physio-geographical and morphometric indicators of the Zabukh and Shamkir Rivers

Rivers	Basin area, km²	Mean Elevation, m	Precipitation, mm	Evaporation, mm	Forest Cover Coefficient, %	Slope,%
Zabukh	896	1970	670	376	28	47
Shamkir	922	1897	650	374	25	48

As evident from the table, the quantitative indicators of the most important factors influencing runoff formation are similar for both rivers. However, their flow quantities and the proportions of surface and subsurface flow components differ significantly.

The average annual runoff layer was 348 mm for the Zabukh River and 294 mm for the Shamkir River. The extensive distribution of fractured volcanic rocks within the Zabukh River basin has created a substantial disparity in the ratio of its surface-to-subsurface flow components, favoring the latter. Specifically, the subsurface flow contribution was 53 % in the Zabukh River, compared to only 42 % in the Shamkir River. Consequently, the infiltration rate was approximately 45 L/day in the former, compared to just 36 L/day in the latter.

Modern hydrological approaches, combined with the capabilities of remote sensing and GIS technologies, have enabled a more in-depth study of an area's geological and geomorphological structure. The geological structure of a territory is of great importance for the more efficient utilization of water resources, particularly from the perspective of river feeding sources.

The influence of the geological structure and surface cover on river flow was assessed using the Karabakh region as a case study. This region is distinguished by its complex geological and geomorphological structure, even within Azerbaijan. The total area of the study region is 13,736 km². For the analysis, the geospatial coverage was defined by fragments of Landsat satellite images with path/rows 188–032 and 168–033 (Fig. 1).



Fig. 1. Location of the study area within the Republic of Azerbaijan and on satellite image fragments

The research process was carried out according to the following sequence:

- Climate data (precipitation, temperature, humidity coefficient, etc.) for the study area for the period 1999–2024 were collected from hydrometeorological observation stations.
- The hypsometric and morphometric components of the study area were assessed.
- Monitoring of changes in Land Use/Land Cover (LULC) types, soil, and vegetation cover was conducted using remote sensing data and GIS technologies.
- The spatial distribution of runoff across the basin was calculated by applying runoff and infiltration coefficients.
- The spatial distribution and temporal variability of components determining the area's moisture content and infiltration levels were identified for the study period.
- Data for all components across the river basin were integrated into a GIS database, and inter-component relationships were analyzed.
- The proportions of surface and subsurface flow contributions to the rivers were estimated using ArcGIS computational, comparative, and statistical software tools.

The processing phase encompassed every distinct combination of these components. Consequently, the moisture levels were refined according to various component scenarios. The variability of runoff and infiltration coefficients from precipitation for different moisture levels (humid, dry, and average multi-annual periods) within selected LULC types is presented in Table 4.

The validation of the assessment has also proven successful. For over 30 river basins with diverse physio-geographical conditions in the Karabakh region, the error between the actual and the newly calculated surface and subsurface flow components was within 10 % in 84 of cases, and between 10–18 % in the remaining instances. This indicates a high reliability of the obtained results. The results we obtained using remote sensing methods and GIS technologies were also compared with the results of previous studies conducted in similar areas using traditional methods and were completely justified (Imanov, & Alakbarov, 2014; Aliyev, 2000).

ISSN 1728-3817

Table 4

Distribution of runoff and infiltration coefficients from precipitation under three moisture conditions (I: humid period, II: dry period, III: average multi-annual period)

LULC	HSG	Situation	Surface runoff coefficient	Infiltration coefficient
Forests and gardens	A	I	0.11	0.55
		II	0.10	0.39
		III	0.085	0.295
	B	I	0.14	0.51
		II	0.13	0.34
		III	0.10	0.26
	C	I	0.16	0.47
		II	0.14	0.31
		III	0.115	0.215
	D	I	0.20	0.41
		II	0.17	0.27
		III	0.125	0.185
Cultivated areas	A	I	0.18	0.46
		II	0.17	0.33
		III	0.145	0.255
	B	I	0.22	0.38
		II	0.20	0.27
		III	0.15	0.22
	C	I	0.27	0.28
		II	0.24	0.21
		III	0.165	0.175
	D	I	0.32	0.25
		II	0.27	0.17
		III	0.175	0.125
Semi-deserts and dry steppes	A	I	0.67	0.10
		II	0.16	0.06
		III	0.075	0.075
	B	I	0.68	0.08
		II	0.185	0.045
		III	0.0825	0.0325
	C	I	0.70	0.06
		II	0.205	0.035
		III	0.09	0.11
	D	I	0.72	0.05
		II	0.22	0.03
		III	0.086	0.011

When mapping the main components influencing groundwater flow, an entirely new approach was applied for interpolating and extrapolating hydrometeorological data. In ArcGIS, the maps of key components were reclassified, integrated through overlay analysis, and compared with runoff indicators. The combination of components via overlay and the assessment of their interactions represent an innovative methodological contribution to geoinformation mapping. Figures 2 and 3 display the most critical factors determining infiltration intensity and subsurface flow formation in the Karabakh region. Fig. 2 illustrates the river network and land cover (LULC) characteristics of the study area, whereas Fig. 3 highlights the principal climatic and hydrogeological drivers affecting both surface and subsurface river flow.

The trends in soil and vegetation cover, landscape changes, water resources, and the key climatic factors influencing them within the Karabakh territory from 2000 to 2023 are presented in Table 5.

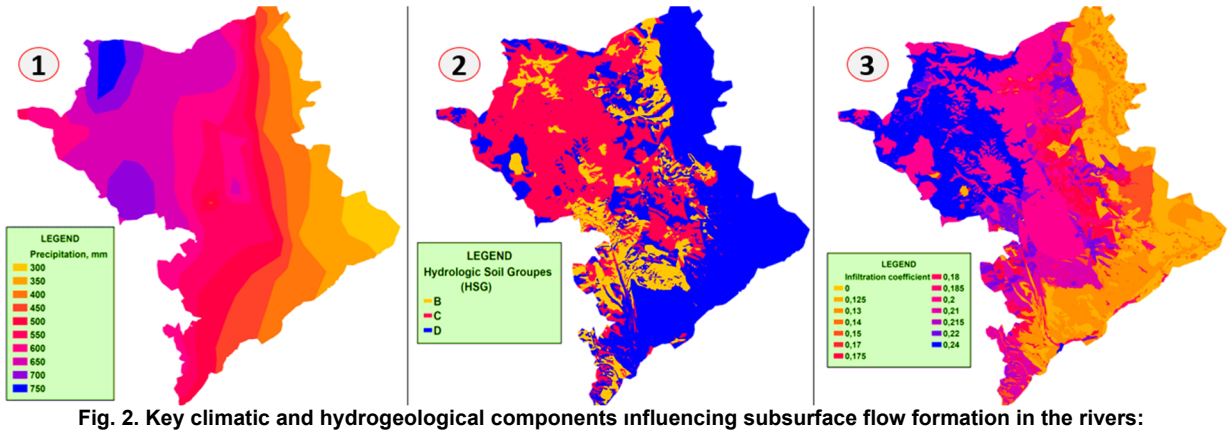


Fig. 2. Key climatic and hydrogeological components influencing subsurface flow formation in the rivers:
1 – Precipitation; 2 – Hydrologic soil groups (HSG); 3 – Infiltration coefficient

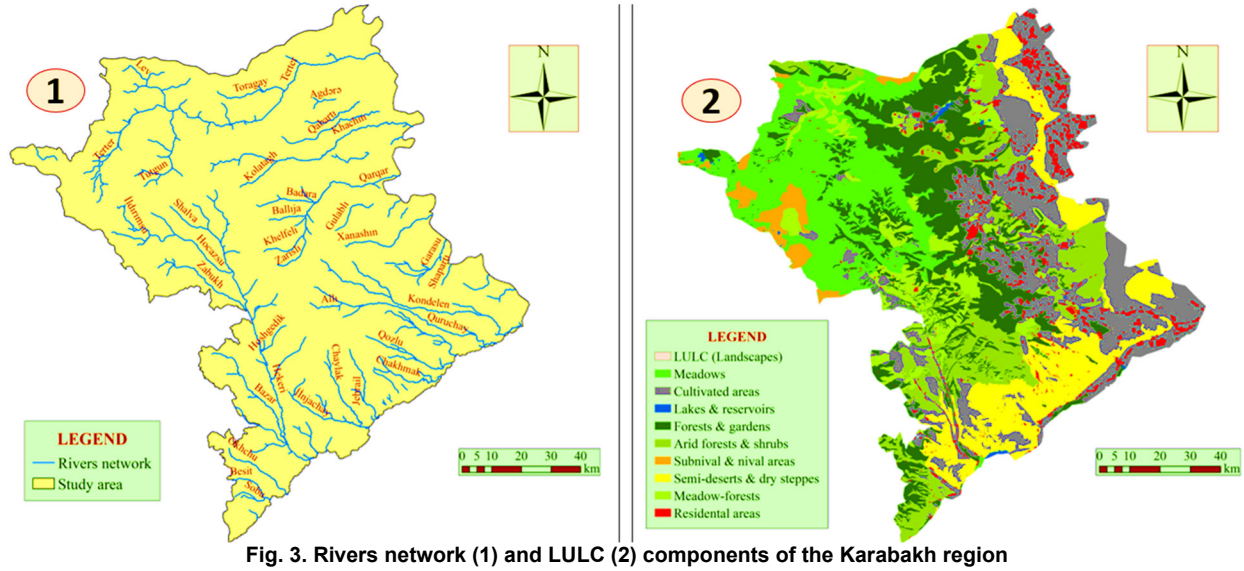


Fig. 3. Rivers network (1) and LULC (2) components of the Karabakh region

Table 5

Changes of hydrometeorological and land cover components in 1999–2024

Study subjects	1999	2024	Difference, %
Air temperature, °C	8.26	9.03	+8.53
Atmospheric precipitation, mm	579.3	528.7	–7.08
Potential evapotranspiration, mm	778.4	849.5	+8.46
Actual evaporation, mm	420.5	382.0	–9.16
Air humidity coefficient	0.744	0.622	–16.4
Factual soil moisture, mm	196.3	171.9	–12.4
Initial abstraction	268.9	304.1	+11.6
Maximum soil water retention, mm	1043.2	1119.7	+6.83
Area of dense vegetation cover, km^2	2251.3	1919.1	–14.8
Areas with poor infiltration capacity (HSG "D"), km^2	6119.4	6623.3	+7.61
Areas with high surface runoff, km^2	1850.2	1453.7	–21.4
Surface runoff coefficient	0.1322	0.1215	–8.13
Infiltration coefficient	0.1351	0.1182	–12.5
Ratio of infiltration to surface runoff	1.022	0.973	–4.79

The changes observed in both climate and surface cover from 1999 to 2024 have been unfavorable for the natural regulation of river flow. Negative shifts in climatic parameters have further consolidated the surface layer, adversely affecting soil moisture and infiltration processes. During this period, the actual water retention capacity of the soils decreased by 12.4 %, while the maximum retention potential increased by 6.83 %. Furthermore, a decrease of 11.6 % was observed in the initial abstraction parameter, which is critical for determining the runoff and infiltration potential of the area.

Landscape types and vegetation density also significantly influence infiltration and the natural regulation of rivers. Landscapes with dense vegetation cover, such as forests and meadows, slow down the conversion of precipitation into surface runoff through root systems and enhance infiltration. Conversely, in areas deprived of or poor in vegetation – such as deserts, semi-deserts, dry steppes, nival and subnival zones, and badlands - the impermeability of the surface weakens the infiltration process (Antoneli, Thomaz, & Bednarz, 2019; Zhu et al., 2022).

Between 1999 and 2024, significant landscape transformations occurred in the Karabakh region under the influence of climate change and human activity. This is particularly evident in the reduction of areas with dense vegetation cover, such as subalpine and alpine meadows, which decreased by 13.4 %, and forests, which saw a 15.5 % reduction. Conversely, areas characterized by semi-desert and dry steppe landscapes increased by 12.4 %, while unproductive lands and badlands expanded by 13.3 %. Overall, these land use and land cover (LULC) changes have led to a further consolidation of the region's surface layer and a weakening of its infiltration capacity. In this process, the military landscapes (belligerative) created as a result of the prolonged conflict have also had a notable impact.

The distribution of the ratio between surface and subsurface flow for the rivers in the Karabakh region over the average multi-annual period covering 1999–2024 is presented in Table 6.

In most rivers, the surface flow component typically predominates over the subsurface contribution. The ratio of subsurface flow to surface flow (k=Qu/Qs) is considered an indicator of a river's natural regulation. The higher this value, the more naturally regulated the flow is considered. A natural regulation index of k≥1.0 indicates highly regulated flow, a value between 0.5–1.0 indicates moderate regulation, and a value of ≤0.5 indicates poorly regulated flow.

As can be seen from Table 6, the subsurface flow contribution in most of the largest and most abundant rivers of the Karabakh region (e.g., Tartar, Hakari, Bazar) and their tributaries (e.g., Tutgun, Turagay, Zabukh) is either greater than or approximately equal to the surface flow contribution. This is related to the fact that the formation areas of these rivers are largely situated within the Karabakh volcanic plateau, which is predominantly composed of fractured rocks (Mukhtarov et al., 2015).

Table 6

The level of surface and underground feeding of major Karabakh rivers (with %)

Rivers	Catchment area, km²	Precpitation, mm	Runoff coefficient	Surface runoff, Qs, mm	Baseflow, Qu, mm	Ratio Qu/Qs
Tartar	2650	623.4	0.4135	46.0	54.0	1.174
Levchay	367	764.5	0.5932	50.4	49.6	0.984
Tutgun	522	617.1	0.4426	46.2	53.8	1.165
Turagay	172	728.7	0.6751	44.3	55.7	1.257
Khachın	657	547.2	0.2918	54.1	45.9	0.848
Qarqar	1490	413.1	0.1925	70.0	30.0	0.429
Kondelen	536	432.6	0.1107	71.6	28.4	0.397
Quruchay	512	478.6	0.1928	62.6	37.4	0.597
Bazar	2711	587.3	0.3418	47.3	52.7	1.114
Hekeri	2570	602.2	0.3223	42.2	57.8	1.369
Zabukh	527	689.3	0.4471	47.4	52.6	1.109
Okhchu	1175	594.7	0.2443	50.7	49.3	0.972
Besit	354	536.2	0.1745	48.3	51.7	1.071
Bartaz	33.5	471.8	0.1332	56.3	43.7	0.776
Injachay	351	453.3	0.0814	74.9	25.1	0.335
Chaylak	190	461.1	0.1036	75.7	24.3	0.321
Chakmakh	110	376.3	0.0462	70.0	30.0	0.428
Jebrail	78.3	403.6	0.0579	86.4	13.6	0.157
Qozlu	99.8	382.7	0.0843	77.3	22.7	0.297
Chereken	134	352.1	0.0628	71.5	28.5	0.398
Garasu	168	326.4	0.0389	80.6	19.4	0.241
Khanashın	234	411.2	0.0743	80.2	19.8	0.247
Qabartı	96.8	544.3	0.1808	60.1	39.9	0.663
Karabakh	13736	541.5	0.2633	50.7	49.3	0.972

The high porosity of the widespread rocks in this area increases the proportion of precipitation allocated to infiltration. This water subsequently contributes to the river's total discharge, facilitating natural regulation. A significant portion of rivers with a natural regulation index above 0.4 are also located in areas dominated by rocks with high water-conducting properties.

In contrast, rivers flowing through the southern and southwestern parts of the Karabakh region (e.g., Injachay, Chaylag, Chakhmaq, Jabrayil) generally exhibit very low k-values. The headwaters of these rivers are situated significantly downstream from the fractured rocks of the volcanic plateau. Their basins lie in an arid climate zone where 65–85 % of precipitation is lost to evaporation. Due to the prevalence of impermeable and non-porous rocks, the remaining precipitation (20–30 %) contributes primarily to surface runoff. In these rivers, surface runoff often constitutes 70–80 %, and sometimes up to 90 %, of the total discharge. The poor regulation of flow, coupled with the fact that many of these rivers dry up in summer, creates additional challenges for utilizing their water resources. Consequently, artificial regulation of river flow is prioritized here, typically achieved through the construction of on-stream or off-stream reservoirs.

Figure 4 provides an example of three rivers in the Karabakh region (Turagay, Levchay, and Khanashin) that exhibit distinct differences in their subsurface flow contributions.

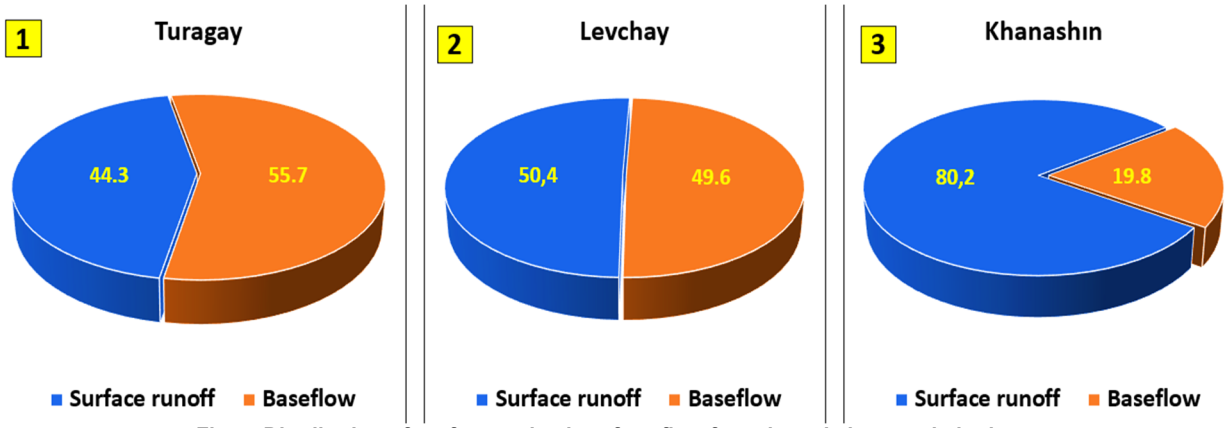


Fig. 4. Distribution of surface and subsurface flow for selected characteristic rivers

As illustrated in Figure 3, the subsurface flow contribution to the Turagay River's discharge is higher than its surface flow component. This is primarily related to the dominance of fractured volcanic rocks within its basin. While the Levchay River basin is situated at a high elevation, leading to a significant contribution from snow and rain, it also features extensively distributed, highly permeable rocks that promote substantial infiltration. Consequently, the contributions of surface and subsurface flow to the Levchay's discharge are approximately equal. In contrast, the Khanashin River, representing rivers that flow primarily through low-lying plains, exhibits virtually no natural regulation. As shown, surface runoff constitutes over 80 % of its total discharge.

Discussion and conclusions

The research has established that the geological structure of a territory plays a crucial role in river flow composition. Specifically, rivers' draining areas with highly permeable rocks exhibit a greater subsurface flow component. This, in turn, creates favorable conditions for the natural regulation of river discharge. Significant variations in flow sources are observed among rivers across different parts of the Karabakh region. Despite this, the overall natural regulation index for the study area was calculated at 0.97. This indicates that surface and subsurface contributions to the total flow of the region's rivers are approximately equal. Rivers originating from the Karabakh volcanic plateau, where fractured rocks are widespread, demonstrate a high degree of natural flow regulation. In the majority of these rivers, the subsurface flow contribution exceeds the surface flow.

In addition to geological structure, the character of the surface cover also significantly influences the natural regulation of river flow. In areas with impermeable surfaces, the rate of precipitation spreading over the basin increases, consequently weakening flow regulation. During the study period (1999–2024), a trend of climatic aridification and vegetation thinning has led to a further consolidation of the surface cover in the Karabakh region. As a result, the initial abstraction (the potential for precipitation to generate runoff) decreased by 11.4 %, and the natural regulation index (the ratio of infiltration to surface runoff) declined by 4.79 %.

Authors' contribution: Movlud Teymurov – conceptualization, methodology, writing (original draft), Emil Jabrayilov – data validation, writing (review and editing), formal analysis, Afag Hajiyeva – data validation, revision and editing.

Sources of funding. The authors declare the absence of external funding for the conduct of this study and preparation of the manuscript for publication.

References

Aliyev, F. Sh. (2000). *Groundwaters of the Republic of Azerbaijan, resource use and geoecological problems* [in Azerbaijani]. [Əliyev, F. Ş. (2000). *Azərbaycan Respublikasının yeraltı suları, onlardan istifadə və geoekoloji problemlər*].

Antoneli, V., Thomaz, E. L., & Bednarz, J. A. (2019). The Faxinal System: Forest fragmentation and soil degradation on the communal grazing land. *Singapore Journal of Tropical Geography,* 40(1), 34–49. https://doi.org/10.1111/sjtg.12258

Ciampittiello, M., Marchetto, A., & Boggero, A. (2024). Water resources management under climate change: A review. *Sustainability,* 16(9), Article 3590. https://doi.org/10.3390/su16093590

Dewangan, S. K., Shrivastava, S. K., Soni, A. K., Yadav, R., Singh, D., Sharma, G. K., ... & Sahu, K. (2023). Using the soil texture triangle to evaluate the effect of soil texture on water flow: A review. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET),* 11(6), 389–390.

El Kenawy, A. M. (2024). Hydroclimatic extremes in arid and semi-arid regions: Status, challenges, and future outlook. In *Hydroclimatic Extremes in the Middle East and North Africa* (pp. 1–22). Elsevier.

Gnann, S. J., Woods, R. A., & Howden, N. J. (2019). Is there a baseflow Budyko curve? *Water Resources Research,* 55(4), 2838–2855. https://doi.org/10.1029/2018WR024464

Hawkins, R. H., Moglen, G. E., Ward, T. J., & Woodward, D. E. (2020). Updating the curve number: Task group report. In *Watershed Management Conference 2020* (pp. 131–140). American Society of Civil Engineers.

Imanov, F. A., & Alakbarov, A. B. (2014). The interaction of surface and groundwater in the context of the underground organization of surface flow in the territory of Azerbaijan. *Materials of Caspian Conference on Water Technologies* (pp. 69–74). Azerbaijan [in Azerbaijani]. [İmanov, F. Ə., & Ələkbərov, A. B. (2014). Azərbaycan ərazisində yerüstü axımın yeraltı təşkili şəraitində yerüstü və yeraltı suların qarşılıqlı əlaqəsi. *Xəzər Su Texnologiyaları Konfransının materialları*].

Lvovich, M. I. (1974). *World water resources and their future* (Translation of the original Russian edition by American Geophysical Union, 1979) [in Russian]. [Львович, М. И. (1974). *Мировые водные ресурсы и их будущее.* Мысль].

Makhmudov, R., & Teymurov, M. (2024). Importance of using GIS software in the process of application of Analogue terrains and Counter-approach technologies in water resources assessment. *Advanced Remote Sensing,* 4(1), 36–45.

Makhmudov, R., Aliyev, V., Teymurov, M., & Gafarov, E. (2024). Regional climate changes in Azerbaijan and assessment of their impact on water resources with a new method. *Reliability: Theory & Applications,* 19(SI 6 (81)), 830–837.

Makhmudov, R., Teymurov, M., Agayev, Z., & Jabrayilov, E. (2025). Assessment of water resources in Nakhchivanchay River Basin using runoff coefficients method. *Proceedings of the Bulgarian Academy of Sciences,* 78(9), 1312–1318.

Mammadov, G. S., Teymurov, M. A., Mammadov, Z. R., Yusifova, M. M., Osmanova, S. A., Gasimov, A. M., ... & Salimova, S. J. (2025). Climate change effects on soil fertility and moisture in the Nakhchivanchay River Basin, Azerbaijan. *International Journal of Agriculture and Biosciences,* 14(5). https://doi.org/10.47278/journal.ijab/2025.152

Mishra, R. K. (2023). Fresh water availability and its global challenge. *British Journal of Multidisciplinary and Advanced Studies,* 4(3), 1–78.

Mukhtarov, A. Sh., Kadirov, F. A., Feyzullayev, A. A., Huseynov, D. A., Aliyev, Ch. S., et al. (2015). *Geology of Azerbaijan* (A. A. Alizadeh, Ed.; Vol. 2). Elm Publishing House [in Azerbaijani]. [Azərbaycanın geologiyası (Akad. A. A. Əlizadə, red.; Cild 2). "Elm" nəşriyyatı]. https://www.researchgate.net/publication/312176204

National Atlas of the Republic of Azerbaijan. (2014). *State Land and Cartography Committee of the Republic of Azerbaijan*. Baku Cartographic Factory.

Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Kieu Diem, P., & Huo, L. Z. (2021). A modified bare soil index to identify bare land features during agricultural fallow periods in Southeast Asia using Landsat 8. *Land,* 10(3), Article 231. https://doi.org/10.3390/land10030231

Nielsen, R., & Hjelmfelt, A., Jr. (1998). Hydrologic soil group assignment. *International Water Resources Engineering Conference, ASCE,* 2, 1297–1302.

Nilsson, C., Reidy, C. A., Dynesius, M., & Revenga, C. (2005). Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science,* 308(5720), 405–408. https://doi.org/10.1126/science.1107887

Rianti, D. I., & Sari, D. N. (2024). Analysis of changes in vegetation density Index in Surakarta City 2018-2022 using LANDSAT-8 OLI/TIRS satellite imagery. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,* 1357(1), Article 012033. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1357/1/012033

Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., & Hanan, N. P. (2018). HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data,* 5, Article 180091. https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91

Rustamov, S. G., & Kashkay, R. M. (1978). *Water balance of the Azerbaijan SSR*. Elm Publishing House.

Sivakumar, B. (2011). Global climate change and its impacts on water resources planning and management: Assessment and challenges. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,* 25(4), 583–600. https://doi.org/10.1007/s00477-010-0423-y

Teymurov, M. A. (2022). The value of initial abstraction and estimation of runoff-forming rainfall rate at a specific geographical location. *Science, Education and Innovation in the Context of Modern Problems,* 5(4), 123–136.

Tonkin, J. D., & Death, R. G. (2014). The combined effects of flow regulation and an artificial flow release on a regulated river. *River Research and Applications, 30*(3), 329–337.

USDA & NRCS (United States Department of Agriculture & Natural Resources Conservation Service). (2009). *Hydrologic soil-cover complexes* (National Engineering Handbook, Part 630, Hydrology, Chapter 9). https://irrigationtoolbox.com/NEH/Part630_Hydrology/H_210_630_09.pdf

Wang, H., Jiang, X. W., Wan, L., Han, G., & Guo, H. (2015). Hydrogeochemical characterization of groundwater flow systems in the discharge area of a river basin. *Journal of Hydrology, 527*, 433–441. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.04.063

Wang, X., Liu, T., & Yang, W. (2012). Development of a robust runoff-prediction model by fusing the rational equation and a modified SCS-CN method. *Hydrological Sciences Journal,* 57(6), 1118–1140.

Wang, J., Cui, C., Jia, Z., Liu, M., Pang, S., & Zhai, K. (2024). Analysis of the responses of surface water resources to climate change in arid and semi-arid area. *Agricultural Water Management, 295*, Article 108751. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108751

Zhu, G., Yong, L., Zhao, X., Liu, Y., Zhang, Z., Xu, Y., ... & Wang, L. (2022). Evaporation, infiltration and storage of soil water in different vegetation zones in the Qilian Mountains: A stable isotope perspective. *Hydrology and Earth System Sciences,* 26(14), 3771–3784. https://doi.org/10.5194/hess-26-3771-2022

Отримано редакцією журналу / Received: 28.01.26
Прорецензовано / Revised: 29.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Мовлуд ТЕЙМУРОВ[1], канд. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0009-0008-2038-2321
e-mail: movlud_teymurov@yahoo.com

Еміль ДЖАБРАЙЛОВ[1], наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-9391-4319
e-mail: emil.jabrayilov@gmail.com

Афаг ГАДЖИЄВА[2] канд. геогр. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-9813-7835
e-mail: afag_hajiyeva@unec.edu.az

[1]Інститут географії, Міністерство науки та освіти, Баку, Азербайджан
[2]Азербайджанський державний економічний університет (UNEC), Баку, Азербайджан

ВПЛИВ ПОКРИВУ ЗЕМЛІ ТА ГЕОЛОГІЧНОЇ СТРУКТУРИ НА ПРИРОДНЕ РЕГУЛЮВАННЯ РІЧКОВОГО СТОКУ

В с т у п . ***У посушливих та напівпосушливих регіонах, таких як Карабаський регіон Азербайджану, ефективне управління дефіцитними водними ресурсами критично залежить від природного регулювання річкового стоку. Цей процес, який забезпечує більш збалансований внутрішньорічний розподіл води, традиційно вважався таким, на який впливають клімат і поверхневий покрив. Однак специфічна роль геологічних структур, що лежать в основі, часто оцінювалася лише опосередковано, що становить значний виклик для дослідження. Це дослідження аналізує вплив як геологічних формацій, так і характеристик поверхневого покриву на природне регулювання річкового стоку з 1999 по 2024 роки – період, позначений кліматичними змінами та значними змінами ландшафту.***

М е т о д и . ***Було використано комплексний підхід, що поєднує гідрометеорологічні дані, дані дистанційного зондування Землі та ГІС-технології. Дослідження ґрунтувалося на довгострокових кліматичних даних (опади, температура), супутникових знімках (Landsat) та цифровій моделі рельєфу. Ключовими методиками були застосування методу NRCS-CN (Natural Resources Conservation Service Curve Number) та розрахунок коефіцієнта природного регулювання (NRR), визначеного як співвідношення підземного базового стоку (Qu) до поверхневого стоку (Qs). Гідрологічні групи ґрунтів (HSGs) та різні індекси (NDVI для рослинності, BSI для оголеного ґрунту) аналізувалися для характеристики видів земного покриву та їх змін. Аналіз зосереджувався на порівнянні річкових басейнів із схожими кліматичними та морфометричними характеристиками, але різною геологією.***

Р е з у л ь т а т и . ***Дослідження підтвердило, що геологічна структура є першочерговим чинником. Річки, що дренують тріщинуваті вулканічні породи Карабаського плато, демонстрували високі значення NRR (часто понад 1,0), причому внесок підземного стоку сягав 53 %, а швидкість інфільтрації становила ~45 л/добу. На противагу цьому, річки на півдні, що лежать на водонепроникних породах, показали дуже низький NRR, із переважанням поверхневого стоку (70–90 % загального стоку). Загалом середньорегіональний показник NRR становив 0,97, що вказує на майже рівновагу між поверхневими та підземними джерелами стоку. Однак спостерігалася негативна тенденція: протягом 25-річного періоду зміни ландшафту, спричинені аридифікацією та зменшенням рослинного покриву, призвели до консолідації поверхні. Це спричинило зменшення потенціалу початкової абстракції на 11,4 % та зниження регіонального NRR на 4,79 %, що свідчить про зменшення природної регулювальної здатності.***

В и с н о в к и . ***Результати остаточно демонструють, що геологічна основа є вирішальним чинником природного регулювання річкового стоку в аридних регіонах. Наявність тріщинуватих, проникних порід сприяє високій інфільтрації та значному підземному стоку, створюючи природне сховище, яке забезпечує наявність води в посушливі періоди. Отже, оцінка геологічного контексту є необхідною для ефективного планування водних ресурсів. Виявлене зниження коефіцієнта природного регулювання підкреслює вразливість цих водних систем до тривалих змін клімату та деградації земель. Для річок із вроджено низьким регулюванням штучні заходи, такі як будівництво водосховищ, залишаються необхідними. Це дослідження надає критично важливу основу для пріоритизації стратегій управління водними ресурсами на основі специфічних гідрогеологічних характеристик басейну.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***геологічна структура, покрив землі, регулювання річкового стоку, базовий стік, швидкість інфільтрації, початкова абстракція.***

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 631.95:528.9
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.12

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

Olexandr NIKOLAIENKO[2], PhD (Engin.)
ORCID ID: 0000-0002-8895-5412
e-mail: n-a-@ukr.net

Tetiana PASTUSHENKO[1], PhD (Phil.), Assoc. Prof.,
ORCID ID: 0000-0001-9826-5004
e-mail: tatiana.v.pastushenko@gmail.com

Iryna SIUIVA[1], PhD (Law), Assoc. Prof.,
ORCID ID: 0000-0002-5001-2750
e-mail: isiuiva.knu@gmail.com

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv Ukraine
[2]National State University "Kyiv Aviation Institute", Kyiv, Ukraine

GIS-BASED MODELING OF SPATIALLY EXPLICIT AGRICULTURAL MACHINERY MOVEMENT IN PRECISION AGRICULTURE SYSTEMS

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

Background. *The development of precision agriculture technologies is accompanied by a rapid increase in the volume of spatial-temporal data that characterizes not only the state of agroecosystems but also the operational parameters of agricultural machinery. In this context, the use of Global Navigation Satellite System (GNSS) data for analyzing machinery movement regimes within individual fields becomes particularly important.*

Methods. *An approach to the spatial-temporal analysis of agricultural machinery movement based on GNSS trajectories using geographic information systems is presented. The study relies on representing the movement trajectory as a set of elementary spatial-temporal segments for which metric, temporal, and speed characteristics are determined. This makes it possible to move from purely temporal or average indicators to a spatially oriented interpretation of movement parameters.*

Results. *The study was conducted using a production agricultural field located in the western region of Ukraine as a case study. Based on GNSS data, machinery movement trajectories were reconstructed, segmented, and average movement speeds were calculated for individual segments. The results were visualized in the form of thematic maps and graphs that reflect the spatial variability of speed regimes within the field.*

The analysis revealed pronounced within-field heterogeneity in machinery speed, caused by field configuration, the organization of passes, and maneuvering zones. The spatial representation of speed parameters made it possible to identify and visualize zones of stable operation, deceleration, and turning, which are not always detectable through tabular or purely temporal data analysis.

Conclusions. *The obtained results confirm the feasibility of using segmented spatial-temporal analysis of GNSS trajectories to study the movement of agricultural machinery and substantiate the applicability of this approach in precision agriculture technologies for evaluating the efficiency of field operations and supporting management decision-making.*

Keywords: *precision agriculture, Global Navigation Satellite System (GNSS), geographic information systems (GIS), machinery movement trajectory, spatial-temporal analysis.*

Background

One of the key components of modern precision agriculture technologies is the use of satellite positioning systems such as Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and GPS, which provide highly accurate spatial positioning of objects within agricultural lands. The application of GNSS data has led to the development of the precision agriculture concept, which is oriented toward site-specific field management using variable rate application, prescription maps, and spatially differentiated agrotechnological decisions. Due to the capability of continuous real-time coordinate determination, GNSS technologies form the foundation for spatially informed management of production processes and improved resource-use efficiency in agriculture.

GNSS/GPS systems, including global and regional satellite constellations, are integrated with Geographic Information Systems (GIS) and specialized software, enabling field mapping, monitoring of agricultural machinery movement, automated control of machine-tractor units, and analysis of field operation performance. The use of GNSS receivers allows high-precision recording of soil sampling locations, execution of technological operations, and the formation of spatially referenced datasets related to yield, agro-landscape conditions, soil moisture availability, and other agroecological indicators.

Precision agriculture is aimed at creating an integrated decision support system that enhances the efficiency and sustainability of agricultural practices (Zatserkovnyi et al., 2025a). The development of precision agriculture technologies

© Zatserkovnyi Vitaliy, Vorokh Victor, Nikolaienko Olexandr, Pastushenko Tetiana, Siuiva Iryna, 2026

ISSN 1728-3817

is accompanied by a rapid increase in spatial-temporal data characterizing both agroecosystem conditions and operational parameters of agricultural machinery. GIS and GNSS are considered fundamental tools for collecting, processing, and analyzing information necessary to improve the efficiency of agrotechnological operations (Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger, & Wasle, 2008; McBratney et al., 2005).

Geographic Information Systems play a leading role in collecting, processing, and analyzing data applied in precision agriculture systems. They enable the integration of geospatial information within a unified environment, providing a basis for informed management and optimization of agricultural production processes.

It is important to note that modern precision technologies not only enhance agricultural efficiency but also contribute significantly to environmental protection. They reduce ecosystem pressure, optimize the use of fertilizers and pesticides, and support biodiversity conservation (Gebbers, & Adamchuk, 2010).

One of the important applications of GNSS technologies in agriculture is the monitoring of machine-tractor unit movement during field operations. GNSS-based trajectory data include spatial coordinates and timestamps, allowing machinery movement to be treated as a spatiotemporal process. The analysis of such data enables assessment of speed regimes, duration of technological operations, detection of idle periods and inefficient maneuvers, as well as optimization of machinery fleet utilization (Godwin et al., 2003; Zhang, & Pierce, 2013).

Machinery speed significantly affects the quality of field operations, energy consumption levels, and overall agricultural productivity (Bochtis, Sørensen, & Busato, 2014). At the same time, effective use of GNSS data requires spatially oriented processing, since analysis based solely on averaged or purely temporal indicators does not fully capture intra-field heterogeneity of operating conditions.

Therefore, the development of methods for spatially detailed analysis of agricultural machinery movement parameters using GIS is highly relevant and consistent with modern concepts of precision agriculture and digital transformation of the agricultural sector in Ukraine. The application of spatiotemporal GNSS data analysis enables the transition from purely temporal evaluation of machinery movement to the identification of intra-field variability in technological operations.

The purpose of this study is to test and validate an approach to spatiotemporal analysis of GNSS data for assessing variability in machinery speed regimes and generating speed variability maps.

GNSS data are used for quantitative assessment of operational parameters of agricultural units, including travel speed, operation duration, and idle time. For instance, Zandonadi et al. (2021) applied GNSS data to analyze operational efficiency of combine harvesters, tractors, self-propelled sprayers, and other agricultural machinery, where travel speed was considered one of the performance indicators of technological operations.

Trajectory analysis based on GNSS data is widely used to determine operating modes of agricultural machinery, evaluate the duration of individual technological operations, and plan fieldwork. Within this framework, spatiotemporal characteristics of machinery movement serve as an informational basis for managerial decision-making in precision agriculture systems, particularly for optimizing the utilization of machine-tractor units (Catania, & Vallone, 2020).

However, in most existing studies, GNSS data are analyzed predominantly in the temporal domain without detailed spatial generalization within agricultural fields. Time-series speed analysis allows identification of productive and non-productive operational modes, as well as detection of stops, maneuvering, and technological pauses, which is practically important for improving machinery organization and performance (Chen, Wang, & Zhang, 2023).

Within telematic systems, GNSS data are integrated with additional onboard sensor measurements, including fuel consumption, engine revolutions, working implement status and position, and inertial measurement units, enabling more comprehensive interpretation of agricultural machinery operating modes (Aubry, Berruto, & Busato, 2019).

At the same time, several studies emphasize the need to move beyond purely temporal analysis toward spatial trajectory interpretation. Kowalczyk, & Hadas (2024) demonstrate that GNSS data enhanced with Real-Time Kinematic (RTK) positioning allows the generation of spatially accurate machinery trajectories suitable for advanced GIS-based analysis, including assessment of intra-field variability in movement regimes.

Methodological foundations for spatial generalization of discrete geodata have been extensively described in the Ukrainian scientific literature. In the monograph by Burachek et al. (2011), approaches to transformation and interpretation of spatial data within GIS are presented, which are relevant for converting discrete GNSS observations into linear process models. Similar methodological approaches are applied in studies by Guo et al. (2018), where GNSS data are combined with geoinformation technologies for analysis of agrotechnological processes.

In addition to temporal analysis, several studies propose spatial interpretation of GNSS data using cartographic methods. GNSS trajectories are considered a basis for high-precision agricultural mapping, where coordinate and speed parameters are generalized into spatial models that allow analysis of field operation characteristics considering field configuration and movement conditions (Bettucci, Lindia, & Trunfio, 2026).

Summarizing the above, a methodological framework for utilizing GNSS data in agricultural machinery movement analysis has been established in scientific research. This framework includes temporal analysis of speed indicators, spatial modeling of trajectories, and cartographic interpretation of results. These approaches provide theoretical preconditions for constructing machinery movement variability maps within individual agricultural fields.

Methods

Methodological approaches to the analysis of agricultural machinery movement based on GNSS data in scientific research are grounded in spatiotemporal trajectory modeling and subsequent geoinformation interpretation (Gebbers, & Adamchuk, 2010; McBratney et al., 2005).

Spatiotemporal analysis of agricultural machinery movement relies on GNSS trajectories, which represent a sequence of discrete spatial positions recorded at specific time intervals. This type of data is widely used for analyzing transport and agricultural production processes, as it enables quantitative assessment of movement parameters under real operational conditions (Catania, & Vallone, 2020; Chen, Wang, & Zhang, 2023).

To transition from discrete GNSS observations to a generalized spatial representation of movement, the trajectory is modeled as a sequence of adjacent segments formed between two consecutive recorded positions of the machinery. The length of an individual trajectory segment is calculated as the Euclidean distance between two

consecutive points in a planar coordinate system (see equation 1):

$$L_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (1)$$

where x_i, y_i and x_{i+1}, y_{i+1} – denote the coordinates of adjacent GNSS points, L_i – represents the length of the i-th trajectory segment.

Representing the trajectory as a sequence of elementary segments corresponds to commonly accepted practices in GIS-based movement analysis. Metric and temporal characteristics of segments are used to identify operational modes (working pass, turning, idle periods) and to perform further spatial generalization within the field boundary.

In spatiotemporal trajectory analysis, formalizing movement as a set of elementary segments with defined metric and temporal characteristics constitutes a key methodological stage (Catania, & Vallone, 2020; Chen, Wang, & Zhang, 2023).

The machinery speed within an elementary trajectory segment is determined as the ratio of the traveled distance to the time required to traverse that distance. This approach is widely adopted in moving-object analysis and GIS-based modeling of transport systems and spatial flows.

The use of a metric coordinate system allows direct application of calculated distance values in further computations, which is a standard approach in GNSS navigation and geospatial analysis studies (Zandonadi, Milan, & Molin, 2021).

The temporal duration of movement within a segment is defined as the difference between timestamps of consecutive GNSS records and is calculated as follows (see equation 2):

$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i, \quad (2)$$

where $t_i$and t_{i+1} – represent the time of registration of the corresponding machinery positions.

In cases of uniform GNSS recording frequency, typical for most telematic systems, the value of Δt_i remains constant or varies within a narrow range, which simplifies subsequent speed analysis (Chen, Wang, & Zhang, 2023; Aubry, Berruto, & Busato, 2019).

The average speed of machinery within an individual trajectory segment is calculated as the ratio of traveled distance to the duration of movement (see equation 3):

$$v_i = \frac{L_i}{\Delta t_i}, \quad (3)$$

where v_i – denotes the average speed within the i-th trajectory segment.

The presented approach to speed estimation is widely applied in studies evaluating the performance efficiency of agricultural machinery, as it allows localization of movement regime changes along the trajectory and their correlation with spatial characteristics of the field (Catania, & Vallone, 2020; Zandonadi, Milan, & Molin, 2021).

The obtained speed values for individual trajectory segments are treated as spatially distributed movement characteristics. Their further aggregation and visualization are performed using thematic cartography methods within a GIS environment, enabling analysis of intra-field variability in speed regimes and identification of zones characterized by reduced or increased machinery speed for subsequent interpretation.

In this study, speed regime analysis was performed using a segmented spatiotemporal approach to GNSS trajectory data. For each trajectory segment, speed was calculated as the ratio of traveled distance to the time interval between GNSS observations. The resulting values were spatially referenced and used to generate a speed variability map within the study field.

The proposed approach is independent of machinery type and can be adapted for analyzing movement of various agricultural units, provided sufficient temporal resolution of trajectory data. All calculations and the construction of the speed variability map were performed using ArcMap software.

Study Area. The study was conducted within a production field with an area of 117 hectares, located near the village of Shypivtsi, Zalishchyky district, Ternopil region, Ukraine (Fig. 1).



Fig. 1. Geographic location of the study area within Zalishchyky district, Ternopil region (based on Google Earth data)

The soil cover of the study area is predominantly represented by typical low humus chernozems and their degraded light loamy varieties. These soils combine high agricultural production potential with increased sensitivity to moisture variations and structural disturbances. Spatial variability of soil texture, microrelief characteristics (Fig. 2), and heterogeneity of the water regime result in noticeable differences in agricultural production processes throughout the entire crop-growing cycle. The combination of these factors allows the study site to be considered a representative object for testing and validating approaches within precision agriculture technologies.

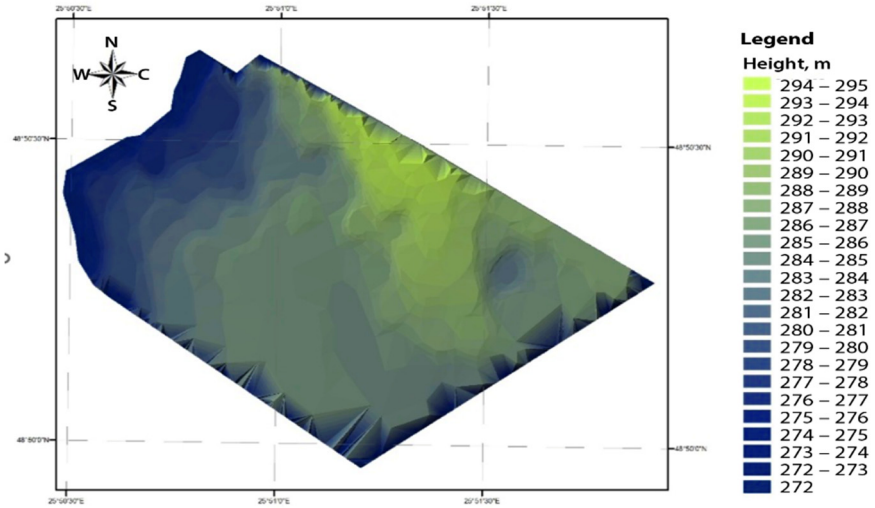


Fig. 2. Microrelief model of the field (scale 1:10,000), generated in ArcMap based on data provided by AgroSEM LLC

Results

As a result of the conducted spatiotemporal analysis of GNSS trajectories of agricultural machinery movement, a dataset of speed characteristics was obtained, reflecting variations in the operational regimes of the machinery unit within the study field. Spatial generalization of the calculated indicators enabled the generation of a speed variability map.

The constructed map revealed pronounced spatial heterogeneity in speed regimes. Areas characterized by stable speed values were identified alongside zones exhibiting increased variability, indicating differences in movement patterns across distinct parts of the field.

The obtained results make it possible to move beyond the analysis of individual GNSS records toward a generalized assessment of the spatial structure of technological operations. Spatial interpretation of speed characteristics can be applied to evaluate the organization of field operations and to assess operational regimes of machine-tractor units.

Within the study field, a dense set of GNSS-based points representing the machinery trajectory during field operations was mapped. The resulting point network forms a detailed spatial pattern corresponding to the actual working passes of the machinery and reflects movement directions, turning maneuvers, and headland operations. Visualization of GNSS observations allows tracing the spatial structure of technological operation performance and serves as a basis for further speed analysis and construction of movement variability maps.

For a more detailed analysis of the spatial structure of machinery movement and to reduce redundancy in the initial dataset, a representative sample of GNSS observations was formed, ensuring uniform trajectory coverage. The presented subset of GNSS points was generated through systematic reduction of the original dataset to 5,000 positions (Fig. 3). This reduction was applied as a technical procedure to standardize subsequent calculations and improve GIS processing efficiency without compromising the overall geometry of the route.

The reduction was performed uniformly according to the chronological sequence of GNSS recordings, preserving the spatial structure of working passes, turning segments, and headland areas, which play a critical role in shaping speed regimes. The resulting set of attribute parameters forms an analytical basis for spatiotemporal interpretation of machinery movement, combining coordinating information with temporal intervals and derived speed indicators. This enables the transition from individual GNSS observations to quantitative analysis of movement regimes along the machinery trajectory.

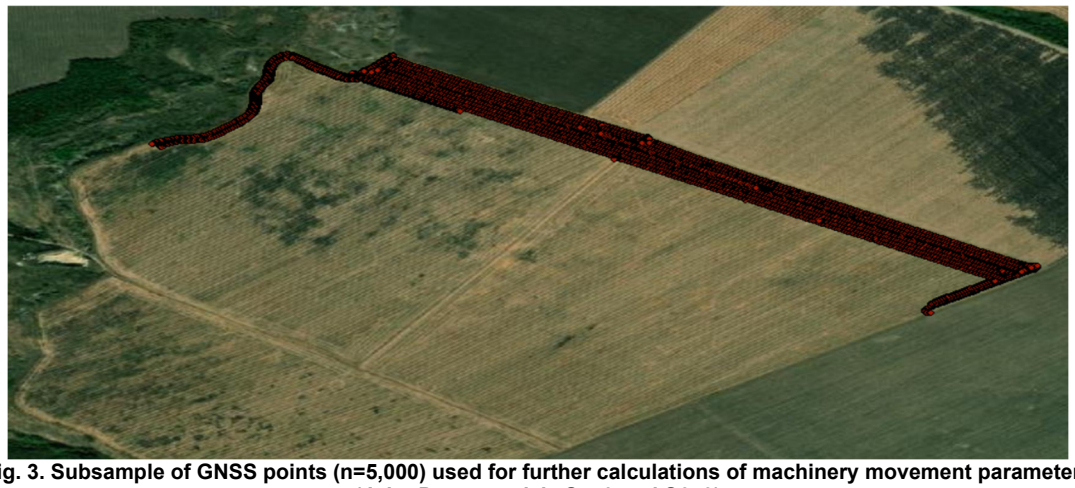


Fig. 3. Subsample of GNSS points (n=5,000) used for further calculations of machinery movement parameters (John Deere models S770 and S670)

Overall, the described approach ensures comparability of results across individual passes and technological operations, provided that a unified trajectory segmentation algorithm is applied. The presented segment clearly reflects the linear component of agricultural machinery movement within an individual field pass and serves as the initial dataset for subsequent spatiotemporal calculations. The sufficient density and orderly distribution of points allow accurate determination of segment lengths, temporal intervals between consecutive records, and derived speed characteristics of machinery movement.

The presented fragment of the GNSS-based trajectory demonstrates regularity in spatial position recording and adequate point density for further movement segmentation. This confirms the suitability of the original GNSS dataset for calculating metric and temporal parameters of trajectory segments without significant loss of geometric accuracy. The obtained results indicate that even after reduction of the initial GNSS dataset, an adequate level of trajectory detail is preserved, which is necessary for subsequent speed parameter analysis and thematic mapping of variability.

Figures 4–5 present the results of spatial visualization of GNSS-based machinery movement trajectories within the designated study field. The points and linear segments represent the sequence of machinery passes during the execution of the field operation.

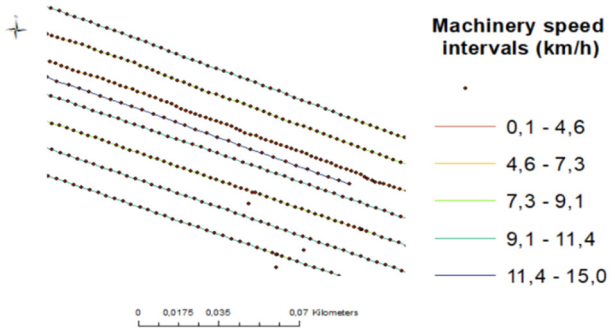


Fig. 4. Spatial distribution of agricultural machinery speed along working passes (straight-line passes)

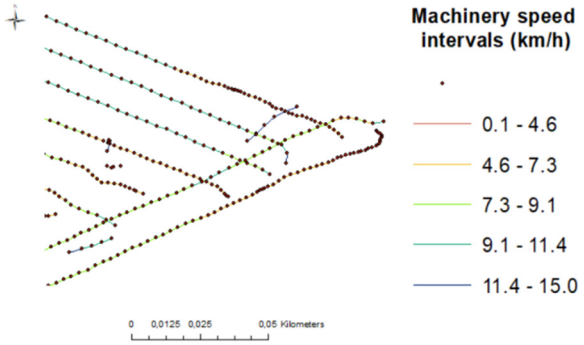


Fig. 5. Fragment of GNSS-based machinery movement trajectories illustrating variations in speed regimes within maneuvering and turning segments

The color coding corresponds to interval classification of movement speed (km/h), enabling clear visualization of variability in speed regimes both along individual passes and between them. The predominance of parallel lines indicates systematic organization of machinery movement in accordance with field configuration, whereas local deviations and directional changes are associated with maneuvering in headland areas and trajectory adjustments during turning operations.

Fragmented color variations along the trajectories indicate uneven speed even within a single pass. Such variability may be influenced by micro-relief conditions, soil heterogeneity, or specific characteristics of the technological process. In this context, spatial representation of speed parameters allows transition from generalized statistical indicators to detailed analysis of intra-field variability in machinery movement.

Analysis of the spatial distribution of speed along trajectories demonstrates that even under an overall regular pass pattern, speed regimes remain heterogeneous. This suggests the presence of intra-field factors affecting machinery movement characteristics that cannot be identified solely through average or purely temporal indicators.

Segments characterized by changes in color correspond to transitions between different speed intervals associated with maneuvering, turning, and organizational aspects of the technological process (Fig. 6).



Fig. 6. Spatial distribution of segmented GNSS-based machinery movement trajectories within the study field

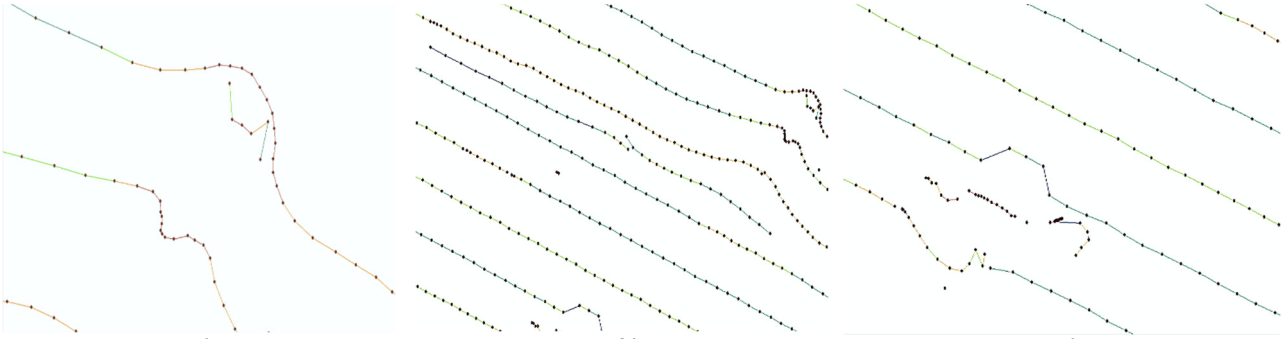
Figure 7 visualizes selected fragments of the spatial structure of agricultural machinery movement trajectories derived from GNSS data, illustrating different types of movement organization and corresponding speed regimes within a single field. In the marginal (headland) areas of the field, trajectory geometry becomes more complex, characterized by transitions from linear movement to curvilinear segments, local directional changes, and short-term stops accompanied by reduced speed values (Fig. 7a). These segments are associated with turning operations, machine alignment, and trajectory adjustments near field boundaries, which are typical during the completion or initiation of working passes.

In the central part of the field, an ordered system of parallel passes dominates, forming a clearly expressed linear trajectory structure (Fig. 7b). These segments are characterized by stable and relatively higher speed values. Minor local deviations in speed within such passes are episodic in nature and are generally caused by short-term steering corrections or specific technological features of field operations, without disrupting the overall regularity of the cultivation scheme.

Transition zones between main working passes and maneuvering areas are characterized by a combination of linear segments with localized changes in direction and speed (Fig. 7c), reflecting the simultaneous influence of operational factors and spatial characteristics of the field.

The presented examples confirm that machinery movement within a single field is heterogeneous both in trajectory geometry and in speed regimes. Cartographic representation of segmented GNSS data provides a foundation for identifying zones of stable operation, maneuvering, and speed reduction within precision agriculture technologies.

The illustrated fragments demonstrate clear differences in spatial movement patterns: working passes are characterized by parallel linear segments with stable speed; turning operations are represented by local loops or arcs with short-term decelerations; technological pauses appear as clusters of points or very short segments with minimal displacement. These areas account for most of the non-productive time and influence overlaps in the headland zones of the field.



a) b) c)

Fig. 7. Selected fragments of GNSS-derived agricultural machinery movement trajectories illustrating spatial differentiation of speed regimes

For further analysis, a thematic spatial visualization of the calculated speed parameters can additionally be presented, where trajectory segments are classified according to average movement speed using a graduated color scale within the field.

Figure 8 presents a cartogram of agricultural machinery pass density constructed because of GNSS telemetric data recorded during the execution of field operations. The resulting visualization characterizes spatial heterogeneity of machinery movement within the field and enables quantitative assessment of pass intensity across different zones.

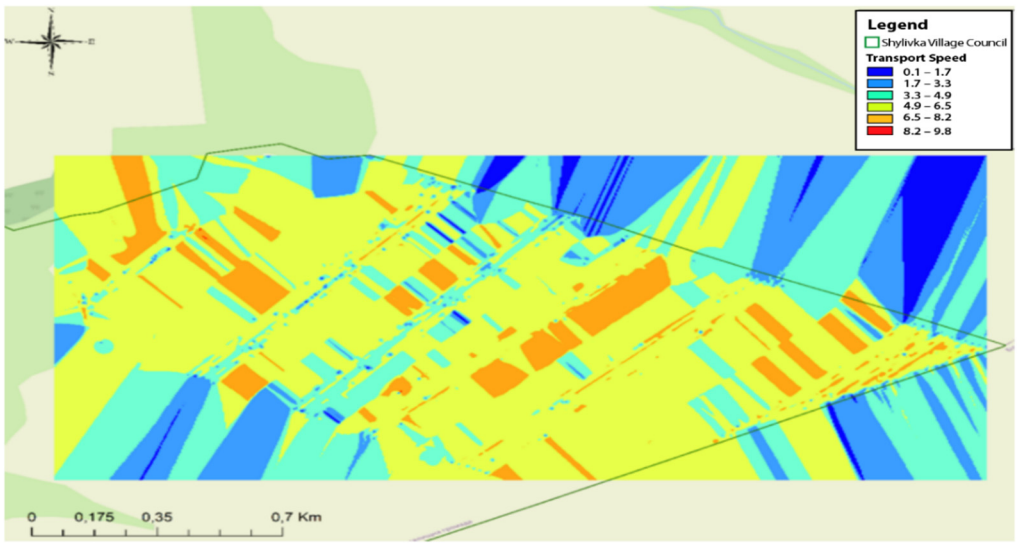


Fig. 8. Map of variability in agricultural machinery movement speed

Areas with the lowest number of passes (0.1–3.2), highlighted in blue and light-blue tones, correspond to zones of episodic or single-pass machinery movement. Such areas may be associated with headland operations, isolated technological maneuvers, or field sections not fully incorporated into the primary cultivation scheme. Their spatial distribution indicates uneven field coverage in certain segments of the route.

Most of the field area is represented by yellow and light-green zones with pass density values ranging from 4.3 to 6.5, corresponding to stable operational movement regimes. These areas reflect the core working scheme of the operation, characterized by relatively uniform movement without significant overlaps or repeated passes. This structure indicates an overall organized routing pattern across most of the field.

At the same time, orange and red zones with increased pass density (8.7–9.8) form localized clusters of excessive movement intensity. Their occurrence is associated with repeated entries, turning operations, field boundary configuration, and local trajectory corrections. Spatial clustering of such zones allows identification of potentially problematic areas where time and energy resources are overdosed.

The constructed cartogram serves as a basis for spatial assessment of machinery movement organization within the field and enables identification of areas with inefficient pass schemes. From an applied perspective, the results can be used to evaluate the effectiveness of existing routing strategies, compare alternative movement schemes, and justify optimization measures in field logistics aimed at reducing overlap and improving the uniformity of agrotechnical load distribution.

The constructed temporal graph of average movement speed (Fig. 9) illustrates variations in machinery speed regimes during the execution of field operations and serves as a tool for analyzing the sequence of movement along the trajectory. Unlike cartographic models that capture the spatial distribution of parameters, this graph allows tracking speed dynamics in chronological order of GNSS observations.

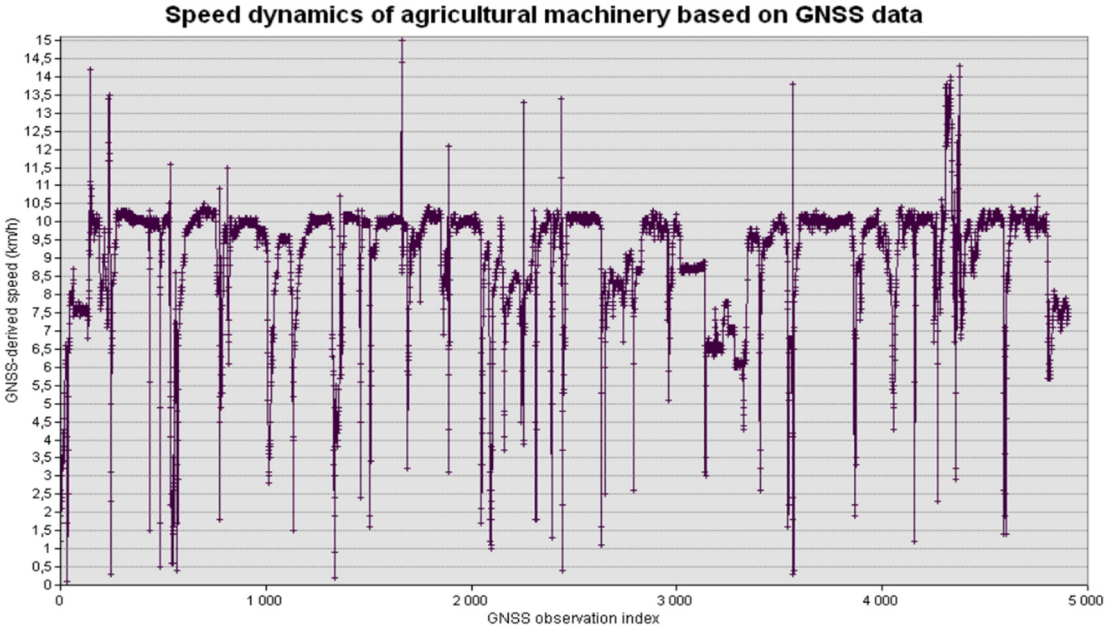


Fig. 9. Average movement speed graph (km/h) based on 5,000 GNSS observations

The *x*-axis represents the GNSS observation index corresponding to the sequential movement of the machinery along the route, while the *y*-axis displays the average speed calculated for adjacent trajectory segments. The predominant concentration of values within the operational speed range indicates relative stability of movement during the main working passes across the field. At the same time, the graph clearly reveals sharp short-term decreases in speed associated with turning operations, stops, maneuvering, or technological pauses during the execution of agricultural operations.

The alternating pattern of stable and transitional speed segments reflects the internal structure of the agrotechnological process and corresponds with spatial zones of increased pass density identified in the variability cartograms. Thus, the temporal graph of average speed complements the cartographic analysis by enabling comparison between spatial movement characteristics and their temporal manifestations, providing a more comprehensive interpretation of GNSS data in the context of field operation assessment.

Within the framework of precision agriculture, this approach enables quantitative evaluation of operational stability and facilitates identification of deviations from optimal movement regimes. The integration of temporal speed characteristics with spatial trajectory models establishes an analytical basis for further optimization of machinery routing schemes, reduction of non-productive intervals, and improvement of engine resource efficiency.

Overall, it should be noted that the accuracy and reliability of the results obtained using the proposed method depend on the quality of the original GNSS data and the frequency of their registration. In the presence of temporal gaps, reduced positioning accuracy, or irregular recording intervals, local errors in speed estimation may occur.

Discussion and conclusions

The study demonstrates the potential of GNSS data for spatially detailed analysis of agricultural machinery

movement within an individual field. The proposed approach enables transition from purely temporal or averaged speed indicators to their spatial interpretation, which is fundamentally important in the context of precision agriculture technologies.

Based on GNSS data, machinery and machine-tractor unit trajectories were reconstructed and segmented into elementary spatio-temporal segments. For each segment, length, time duration, and average speed were calculated, providing the basis for further classification of speed regimes and their cartographic representation.

The results of spatial visualization confirmed that machinery movement speed within a single field is not uniform and varies significantly depending on field configuration, pass patterns, and maneuvering zones. Stable speed regimes with relatively similar values dominate in the central parts of the field, whereas noticeable speed reductions and increased variability are observed in headland areas and turning zones.

The constructed speed variability maps provide spatially detailed interpretation of machinery operational regimes and allow clear localization of zones of deceleration, turning, and transitions between different technological modes. Such spatial characteristics of movement organization cannot always be identified through purely tabular or temporal GNSS data representations, as the latter do not reflect their spatial context.

Geoinformation-based interpretation of segmented GNSS trajectories enables analysis of intra-field heterogeneity of speed regimes in direct relation to field configuration, machinery routing schemes, and maneuvering zones. This confirms the relevance of GIS not only as a visualization tool but also as an analytical framework for generalized interpretation of GNSS data in assessing field operation organization and efficiency.

The obtained results indicate that segmented spatio-temporal analysis of GNSS-based trajectories is an effective tool for evaluating intra-field organization of agricultural machinery movement. It can be applied to optimize routing schemes, improve operational efficiency, and facilitate further integration with remote sensing and productivity data within decision-support systems in precision agriculture.

Authors' contribution: Vitaliy Zatserkovnyi – conceptualization, methodology, writing; Victor Vorokh – remote sensing data processing, methodology; Olexandr Nikolaienko – geoinformation analysis, data processing, writing; Tetiana Pastushenko – data analysis and processing, writing (review and editing); Iryna Siuiva – data analysis and processing.

Sources of funding. The authors declare the absence of external funding for the conduct of this study and preparation of the manuscript for publication.

References

Aubry, C., Berruto, R., & Busato, P. (2019). Telematics and digital technologies for agricultural machinery management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 78–89. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.013

Bettucci, F., Lindia, P., & Trunfio, P. (2026). Operational state classification of agricultural machinery using GNSS data: A minimal-input approach for field efficiency assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 240, 111193. https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.111193

Bochtis, D., Sørensen, C. G., & Busato, P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering*, 126, 69–81. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012

Burachek, V. H., Zatserkovnyi, V. I., & Zhelezniak, O. O. (2011). *Geoinformation analysis of spatial data*. NDU im. M. Hoholia [in Ukrainian]. [Бурачек, В. Г., Зацерковний, В. І., & Железняк, О. О. (2011). *Геоінформаційний аналіз просторових даних*. НДУ ім. М. Гоголя].

Catania, P., & Vallone, M. (2020). Positioning accuracy comparison of GNSS receivers used for precision agriculture. *Agronomy*, 10(7), 924. https://doi.org/10.3390/agronomy10070924

Chen, Y., Wang, X., & Zhang, H. (2023). Field-road classification for GNSS recordings of agricultural machinery trajectories. *Computers and Electronics in Agriculture*, 205, 107937. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107937

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. https://doi.org/10.1126/science.1183899

Godwin, R. J., Richards, T. E., Wood, G. A., Welsh, J. P., & Knight, S. M. (2003). An economic analysis of the potential for precision farming in UK cereal production. *Biosystems Engineering*, 84(4), 533–545. https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00106-3

Guo, J., Li, X., Li, Z., Xu, L., Yan, G., Zhao, C., Fairbairn, D., Watson, D., & Ge, M. (2018). Precise point positioning using multi-GNSS for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19, 895–911. https://doi.org/10.1007/s11119-018-9568-8

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS: Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1

Kowalczyk, K., & Hadas, Z. (2024). Comparative analysis of GNSS positioning concepts dedicated to precision agriculture. *Sensors*, 24(3), 812. https://doi.org/10.3390/s24030812

McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2005). Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 6(1), 7–23. https://doi.org/10.1007/s11119-005-0681-8

Zandonadi, R. S., Milan, M., & Molin, J. P. (2021). Operational efficiency analysis of agricultural machinery using GNSS data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 105991. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.105991

Zatserkovnyi, V. I., Vorokh, V. V., Hloba, O. M., Mironchuk, T. A., & Plichko, L. V. (2025a). Features of applying GIS, GPS, remote sensing and artificial intelligence in soil studies. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(110), 98–117 [in Ukrainian]. [Зацерковний, В. І., Ворох, В. В., Глоба, О. М., Мирончук, Т. А., & Плічко, Л. В. (2025а). Особливості застосування ГІС, GPS, дистанційного зондування Землі та штучного інтелекту у дослідженні ґрунтів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(110), 98–117]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.110

Zatserkovnyi, V. I., Vorokh, V. V., Hloba, O. M., Mironchuk, T. A., & Syuiva, I. S. (2025b). Agrochemical soil analysis in precision agriculture technologies: A case study of Chernihiv region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 85–93 [in Ukrainian]. [Зацерковний, В. І., Ворох, В. В., Глоба, О. М., Мирончук, Т. А., & Сюїва, І. С. (2025b). Агрохімічний аналіз ґрунтів у технологіях прецизійного землеробства: на прикладі Чернігівської області. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(108), 85–93]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.122

Zhang, Q., & Pierce, F. J. (Eds.). (2013). *Agricultural automation: Fundamentals and practices*. CRC Press. http://opac.ascot.edu.ph/ebooks/AGRICULTURE/AgriculturalAutomationFundamentalsandPracticesCRCPressTaylor&FrancisGroup(2013).pdf

Отримано редакцією журналу / Received: 29.01.26
Прорецензовано / Revised: 30.04.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

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

Олександр НІКОЛАЄНКО[2], канд. техн. наук
ORCID ID: 0000-0002-8895-5412
e-mail: n-a-@ukr.net

Тетяна ПАСТУШЕНКО[1], канд. філол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-9826-5004
e-mail: tatiana.v.pastushenko@gmail.com

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
[2]Національний державний університет "Київський авіаційний інститут", Київ, Україна

ГІС-МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВО-ДЕТАЛІЗОВАНОГО РУХУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ В ЗАДАЧАХ ПРЕЦИЗІЙНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

В с т у п . ***Розвиток технологій прецизійного землеробства супроводжується зростанням обсягів просторово-часових даних, що характеризують не лише стан агроекосистем, але й параметри функціонування сільськогосподарської техніки. У цьому контексті особливого значення набуває використання даних глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) для аналізу режимів руху агротехніки у межах окремих полів.***

М е т о д и . ***Розглянуто підхід до просторово-часового аналізу руху сільськогосподарської техніки на основі траєкторій за ГНСС із застосуванням геоінформаційних систем. Дослідження ґрунтується на представленні траєкторії руху у вигляді сукупності елементарних просторово-часових сегментів, для яких визначаються метричні, часові та швидкісні характеристики. Це дає змогу перейти від суто часових або усереднених показників до просторово орієнтованої інтерпретації параметрів руху.***

Р е з у л ь т а т и . ***Дослідження виконано на прикладі виробничого сільськогосподарського поля Західного регіону України. На основі даних GNSS сформовано траєкторії руху агротехніки, виконано їх сегментацію руху та здійснено розрахунок середньої швидкості руху для окремих сегментів. Отримані результати візуалізовано у вигляді тематичних карт і графіків, що відображають просторову варіабельність швидкісних режимів у межах поля.***

Результати аналізу засвідчили наявність вираженої внутрішньопольової неоднорідності швидкості руху техніки, зумовленої конфігурацією ділянки, особливостями організації проходів та зонами маневрування. Просторове подання швидкісних параметрів дозволило ідентифікувати та візуалізувати ділянки стабільної роботи, уповільнення та розворотів, які не завжди виявляються при аналізі табличних або часових даних.

В и с н о в к и . ***Отримані результати підтверджують доцільність використання сегментованого просторово-часового аналізу траєкторій за ГНСС для дослідження руху сільськогосподарської техніки та обґрунтовують можливість застосування такого підходу в технології прецизійного землеробства для оцінювання ефективності польових операцій і підтримки управлінських рішень.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***прецизійне землеробство, глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС), геоінформаційні системи (ГІС), траєкторія руху техніки, просторово-часовий аналіз.***

Віталій Зацерковний є членом редколегії видання, тому не брав участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті. Тетяна Пастушенко є членом редколегії видання, тому не брала участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті.

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.

Vitaliy Zatserkovnyi is the a member of the journal editorial board, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article. Tetiana Pastushenko is the a member of the journal editorial board, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article.

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

УДК 550:004
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.13

Роман КИСЛИЙ, асп.
ORCID ID: 0009-0009-4024-138X
e-mail: rkyslyy@gmail.com
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ ОГЛЯД РЕАЛІЗАЦІЇ INSPIRE-ПОРТАЛІВ ТА НАЦІОНАЛЬНИХ ІНФРАСТРУКТУР ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ

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

Вступ. *Стаття присвячена порівняльному аналізу імплементації Директиви INSPIRE у Німеччині, Норвегії, Польщі, Іспанії та Україні. Розглянуто інституційні, правові та технологічні аспекти становлення національних інфраструктур просторових даних (SDI), а також перехід від традиційної моделі "каталогів даних" до "продуктових сервісів", інтегрованих у цифрові двійники та data spaces. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю адаптації практик держав-членів ЄС до української НІГД в умовах воєнних обмежень та євроінтеграції. Метою дослідження є виявлення ефективних моделей координації та управління національними інфраструктурами просторових даних, оцінка рівня інтероперабельності та гармонізації геоданих у порівнюваних країнах, а також визначення операційних підходів для підвищення ефективності та стійкості української НІГД у контексті майбутньої інтеграції до European Data Space.*

Методи. *Дослідження ґрунтується на аналізі офіційних документів Європейської Комісії, національних звітів INSPIRE Country Fiche, нормативно-правових актів та актуальних рецензованих публікацій (2019–2025 рр.). Застосовано порівняльний та системний підходи до оцінки інституційних моделей, архітектур порталів та технологічних рішень (OGC-сервіси, COG/STAC-формати, семантичний веб, OBDA/GeoSPARQL). Виконано структурований аналіз по країнах з узагальненням трендів і типових викликів.*

Результати. *У Німеччині визначальним є федеративний підхід GDI-DE з єдиним порталом Geoportal.de та координацією BKG; у Норвегії – централізована модель Kartverket у рамках Norway Digital із інтеграцією методів ШІ та семантичних технологій; у Польщі – децентралізована архітектура ПЗГіК та Geoportal.gov.pl з поступовою гармонізацією даних; в Іспанії – багаторівнева мережа IDEE з переходом до cloud-орієнтованих сервісів та впровадженням національної програми дистанційного зондування (PNT). Для України показано подвійну динаміку: нормативне зближення з INSPIRE та одночасне обмеження відкритості в умовах війни. Запропоновано операційні кроки – створення "кураторованого ядра" продуктів, впровадження COG/STAC-каталогів, розробку продуктових API і семантичного рівня доступу до реєстрів.*

Висновки. *Європейські країни демонструють зміщення від формального виконання INSPIRE до створення інтегрованих екосистем геоданих, заснованих на координації, хмарних технологіях та продуктовому підході. Україна має усі передумови для застосування цих моделей: нормативна база та технічне завдання НІГД відповідають європейським вимогам, потрібні лише операційні механізми реалізації. Результати дослідження мають прикладне значення для органів державного управління, розробників геопорталів та наукової спільноти, які працюють над розвитком української інфраструктури геопросторових даних у післявоєнний період.*

Ключові слова: *НІГД, INSPIRE, інституційна координація, інтероперабельність, продукто-орієнтований підхід, метадані, гармонізація геоданих, цифрові двійники.*

Вступ

Постановка проблеми. Стаття присвячена порівняльному аналізу імплементації Директиви INSPIRE у Німеччині, Норвегії, Польщі, Іспанії та Україні. У дослідженні розглядаються інституційні, правові та технологічні аспекти становлення національних інфраструктур просторових даних (НІГД). Особливу увагу приділено еволюції НІГД від традиційної моделі "каталогів даних" до "продуктових сервісів", які інтегровані у цифрові двійники та data spaces. Актуальність дослідження зумовлена гострою необхідністю адаптації успішних практик держав-членів ЄС до умов формування української НІГД. Ця адаптація ускладнюється безпрецедентними викликами, пов'язаними з воєнними обмеженнями, та водночас прискорюється процесами євроінтеграції.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Існуючі публікації та офіційні документи, зокрема звіти Європейської комісії та національні огляди INSPIRE, детально описують інституційні та правові аспекти імплементації директиви. Водночас новітні дослідження (2019–2025 рр.) дедалі частіше фокусуються на технологічній еволюції НІГД – переході до хмарних форматів (COG/STAC), семантичних технологій (GeoSPARQL) та інтеграції з методами ШІ. Цей аналіз показує, що хоча технічні рішення та стандарти добре описані, бракує узагальнювального порівняння операційних моделей та ефективних стратегій координації, особливо в контексті їх адаптації для країн, що проходять етап активної євроінтеграції.

Виділення нерозв'язаних частин загальної проблеми. Як показує аналіз публікацій, загальна проблема полягає у переході від НІГД як каталогів даних до інтегрованих продуктових сервісів. Нерозв'язаною частиною залишається розробка конкретних операційних підходів для України. Хоча українська нормативна база НІГД значною мірою відповідає європейським вимогам, залишаються невирішеними питання практичної реалізації, ефективної координації та, що особливо актуально, балансування між відкритістю даних і безпековими обмеженнями в умовах війни. Відсутній порівняльний аналіз, який би систематизував уроки країн ЄС та запропонував чіткі, адаптовані ідеї та перспективи для української НІГД на шляху до інтеграції в European Data Space.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є виявлення ефективних моделей координації та управління національними інфраструктурами просторових даних, а також оцінка рівня інтероперабельності та гармонізації геоданих у порівнюваних країнах. Ключовим завданням є визначення конкретних операційних підходів для підвищення ефективності та стійкості української НІГД.

Методи

Дослідження виконано на основі порівняльного, системного та структурно-функціонального підходів. Емпіричну базу становили офіційні документи Європейської

© Кислий Роман, 2026

комісії, національні звіти INSPIRE Country Fiche, нормативно-правові акти України та країн порівняння, а також актуальні рецензовані публікації 2019–2025 рр. Для аналізу інституційних моделей, архітектур порталів і технологічних рішень (OGC-сервіси, COG/STAC-формати, семантичний веб, OBDA/GeoSPARQL) застосовано порівняльний аналіз, систематизацію та узагальнення.

Результати

Німеччина. У Німеччині система управління геопросторовими даними вибудована навколо вимог Директиви INSPIRE та національної інфраструктури GDI-DE (Infrastruktur für Geodaten in Deutschland). Вона працює як чітко структурований механізм: стратегічні рішення ухвалює Керівний комітет GDI-DE, за повсякденну координацію відповідає Координаційний офіс при Федеральному відомстві картографії та геодезії (BKG), а технічну частину й стабільну роботу сервісів забезпечує Операційний офіс GDI-DE. Саме він підтримує Geodatenkatalog.de, Geoportal.de, реєстри, інструменти валідації та моніторинг (European Commission, 2025d).

Завдяки такому розподілу відповідальності кожна ланка системи має чітко визначену роль: Steering Committee формує політичний курс, Coordination Office стежить за узгодженістю стандартів і робочих процесів, а Operation Office гарантує безперебійну роботу інструментів і сервісів. У результаті дані публікуються та використовуються за узгодженими правилами, що забезпечує сумісність і передбачуваність всієї системи (European Commission, 2025d).

Важливим прикладом міжвідомчої взаємодії є оновлений портал Geoportal.de, запущений у 2021 р. Він надає доступ до понад 350 000 перевірених наборів даних і карт, а також близько 200 тематично підготовлених шарів, що можуть комбінуватися й відображатися у часових зрізах. За їхнє наповнення та підтримку зворотного зв'язку відповідає спеціальна редакційна команда. Масштаб функціонування порталу забезпечує мережа з понад 3 000 органів влади та наукових установ (BKG, 2021).

На рівні кадастру показовим є впровадження автоматизованої підготовки та вебпублікації стандартних кадастрових оцінок із застосуванням відкритого програмного стека QGIS/PostgreSQL/Lizmap. Цей підхід переводить трудомісткі процедури у відтворювані SQL/Python-конвеєри, що відповідають вимогам прозорості INSPIRE та положенням § 196 Федерального будівельного кодексу Німеччини (Baugesetzbuch, BauGB) (Baugesetzbuch (BauGB), n.d.). Поєднання правового підґрунтя та базових даних (ALKIS/NAS, плани забудови, реєстри цін, угод) із веб-клієнтом формує безперервний ланцюг "обробка→візуалізація→публікація" для муніципалітетів (Ostadabbas et al., 2019).

Іншим цікавим прикладом аналітичного підходу до розбудови сучасної НІГД є аналіз пошукових запитів користувачів порталу EOWeb Geoportal (Німецький аерокосмічний центр). Він виявив типові проблеми, пов'язані з різними словниками й рівнями експертизи користувачів, і став підставою для рекомендацій щодо інтерфейсів фронтенду та механізмів пошуку, адаптованих до різних сценаріїв та забезпечення релевантності результатів для різних аудиторій (Schindler, Paradies, & Twele, 2018).

Подальший розвиток відбувається в межах ініціативи "Цифровий двійник Німеччини" (Digitaler Zwilling Deutschlands), яка передбачає суцільне лазерне сканування території з роздільною здатністю щонайменше 40 точок/м², інтеграцію базових 3D-даних із численними тематичними шарами у хмарній платформі та використання методів штучного інтелекту для сценарного аналізу (від повеней до інфраструктурних навантажень). Цей проєкт синхронізовано з європейською програмою Destination Earth і розглядається як національний внесок у загальноєвропейське моделювання, покликане переводити геопортали з площини "пошук-перегляд" у площину прогнозування наслідків та підтримки прийняття рішень (Hopfstock et al., 2021).

Кліматичний вимір відображено у всенаціональному картографуванні ризиків від зливових дощів, започаткованому BKG у 2019 р. – дворівневе гідродинамічне моделювання з просторовою роздільністю 1 м спирається на дані Німецької метеорологічної служби, топографічну інформацію та об'єкти водного господарства, а результати публікуються у форматі WMS у Geoportal.de. Єдині методика, вихідні дані та візуалізація гарантують зіставність результатів і використання для управління ризиками, а також для попередження населення (Hovenbitzer, Katz, & Lenk, 2023).

На рівні державної цифрової політики GDI-DE розглядається як складова електронного врядування – оновлена Національна стратегія геоінформації 2.0 (NGIS 2.0), ухвалена IT-планувальною радою у 2024 р., визначає розширення номенклатури доступних даних, підвищення їхньої якості, поліпшення доступу та мережевої взаємодії. Паралельно впроваджується Закон про онлайн-доступ 2.0, модернізація державних реєстрів і використання штучного інтелекту у публічному секторі, що посилює попит на інтегровані геодані та сервісні компоненти GDI-DE (European Commission, 2025d; Ostrau, 2024). У сукупності це означає суттєвий зсув від формальної відповідності INSPIRE до практичного застосування геоданих у сценаріях просторового планування, управління ризиками та реагування на небезпеки (Ostrau, 2024).

Норвегія. Норвегія вибудувала національну інфраструктуру просторових даних навколо програми "Norway Digital", започаткованої у 2005 р. До неї входить понад 500 організацій, серед яких близько 50 центральних органів влади, усі муніципалітети, усі губернські адміністрації, а також близько 130 енергетичних і комунальних компаній. Участь кожного учасника формалізується угодою, а координацію здійснює Норвезьке картографічне управління, яке також виступає національним контактним пунктом INSPIRE (European Commission, 2025a).

Центральною правовою основою є Закон про геодані 2010 р., що імплементує INSPIRE у норвезьке законодавство відповідно до Угоди про ЄЕЗ. Відповідно до нього, дедлайни для гармонізації були відтерміновані: до 2020 р. для наборів Annex I, та до 2023 р. – для Annex II і III. Станом на 2025 р. Норвегія офіційно подала 11 гармонізованих наборів Annex I до INSPIRE-geoportal, тоді як по Annex II-III спостерігається відставання через низький пріоритет деяких установ (European Commission, 2025a).

Попри це, норвезькі набори даних широко інтегровані у цифрові робочі процеси в межах єдиного геопорталу Geonorge – від управління дорогами й залізницями до кризового менеджменту, рибальства й охорони довкілля, мають високу деталізацію та точність, часто походять із місцевих систем збору, а їхнє оновлення відбувається регулярно. Висока якість метаданих і систематичне використання в муніципальному та центральному плануванні роблять норвезький досвід показовим прикладом інтеграції INSPIRE в цифрову економіку та державне управління (European Commission, 2025a).

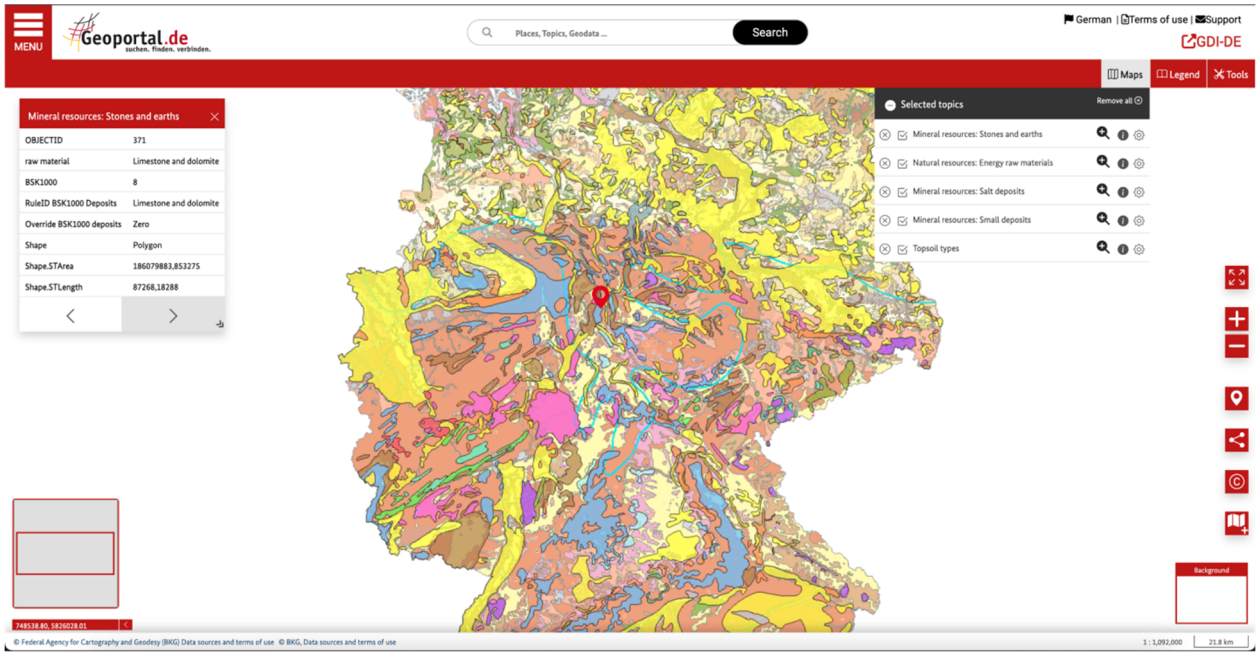


Рис. 1. Користувацький інтерфейс карти мінеральних ресурсів у Geoportal.de

Особливе місце в інфраструктурі посідає моніторинг лісів – Норвегія володіє унікальною мережею з понад 22 000 постійних пробних площ у рамках National Forest Inventory, завдяки чому кожні п'ять років можна отримувати дані для оцінки змін у запасах надземної біомаси. Поєднання цих даних із супутниковими знімками Sentinel-2 і Landsat дало змогу підвищити точність оцінок зміни біомаси (ΔAGB) у 2–3 рази порівняно з польовими методами. Дослідження показали, що навіть використання односезонних знімків Sentinel-2 дозволяє отримувати надійні оцінки ΔAGB, що критично важливо для обліку вуглецевих викидів і поглинання у звітності IPCC (Puliti et al., 2020).

Подальший розвиток відбувся завдяки застосуванню глибинних ансамблів нейронних мереж, які поєднують дані Sentinel-1 (SAR) і Sentinel-2 (оптичні) для створення карт п'яти структурних характеристик лісів (висота 95-го перцентиля, середня висота, щільність, коефіцієнт Джині, фракційне покриття). Тестування на основі даних 41 ALS-місії підтвердило високу точність (частка помилки 11–15 %). Важливо, що модель генерує також карти невизначеності, що підвищує довіру до результатів і придатність для прийняття управлінських рішень у лісовій політиці. На основі цих методів було створено карти структури лісів для всієї території Норвегії з роздільною здатністю 10 м, доступні онлайн як відкритий сервіс (Becker et al., 2021).

У сфері просторового планування ключовим партнером є Copernicus Land Monitoring Service (CLMS). Аналіз показав, що, хоча національні дані (напр., від Норвезького картографічного управління та Норвезького інституту дослідження біоекономіки) є точними та детальними, продукти CLMS, на кшталт Corine Land Cover, Urban Atlas, HRL, забезпечують гармонізацію на європейському рівні й можуть заповнювати прогалини, коли бракує національних програм. Для норвезької практики особливо корисними є дані про зміни землекористування та високодетальні тематичні шари, які можуть інтегруватися в муніципальні планувальні системи (Cysek-Pawlak et al., 2023).

Сучасні виклики інтеграції різнорідних даних вирішуються за допомогою семантичних вебтехнологій – у 2025 р. норвезькі дослідники розробили модульний фреймворк на основі OBDA (Ontology-Based Data Access), що поєднує екологічні та гідрологічні дані з різних джерел у єдиному семантичному графі, що дало змогу здійснювати складні SPARQL-запити, отримуючи результати в табличному та картографічному вигляді, і створює передумови для "цифрових двійників" озер і водозборів. Успішним прикладом застосування стала інтеграція даних для озера Мйоса, де різні зацікавлені сторони отримали спільний доступ до актуальної інформації для моніторингу й управління (Ranatunga et al., 2025).

Таким чином, норвезький досвід демонструє збалансовану модель: з одного боку – сильна державна координація через Norway Digital і Kartverket, з іншого – активна інтеграція новітніх технологій дистанційного зондування, ШІ та семантичних підходів. У результаті геопортали та сервіси стають не лише репозиторіями даних, а й платформами для прогнозування, моделювання й інтегрованого управління природними ресурсами.

Польща. Польська інфраструктура просторових даних ґрунтується на Законі про інфраструктуру просторової інформації 2010 р., який імплементував вимоги INSPIRE та заклав багаторівневу систему управління даними, де центральним координатором виступає Міністерство розвитку і технологій. Додатково діє система з 12 провідних органів, що відповідають за 34 тематичні набори, а також численні органи публічної влади, які ведуть профільні реєстри (European Commission, 2025b). Головним інституційним центром є Головне управління геодезії та картографії, що забезпечує роботу національного геопорталу Geoportal.gov.pl як центральної точки доступу до ресурсів і послуг. Паралельно функціонує портал PZGiK, де інтегровані державні геодезичні та картографічні ресурси, реєстри геодезичної основи (геодезичні, гравіметричні та магнітні мережі), кадастрові дані про земельні ділянки й будівлі, реєстри меж, адрес, географічних назв, ортофотоплани та цифрові моделі рельєфу. Вони становлять референтні дані, на які спирається вся національна НІГД (Doskocz, 2023). Система PZGiK організована на трьох рівнях: центральному, воєводському (16 регіональних центрів документації) та повітовому (понад 370 місцевих

центрів), що відповідає адміністративному поділу та забезпечує децентралізоване ведення й оновлення баз, з інтеграцією в єдину національну систему просторової прив'язки (Doskocz, 2023).

Активне використання цих ресурсів підтверджують дослідження університету AGH: Анкетування показало, що Geoportal.gov.pl є добре відомим і масово застосовуваним сервісом для перегляду, обробки й замовлення даних, що користувачі активно працюють з базами BDOT, цифровими моделями рельєфу, кадастровими картами та подають запити на матеріали PZGiK через портал (Wadowska, Pęska-Siwik, & Maciuk, 2022).

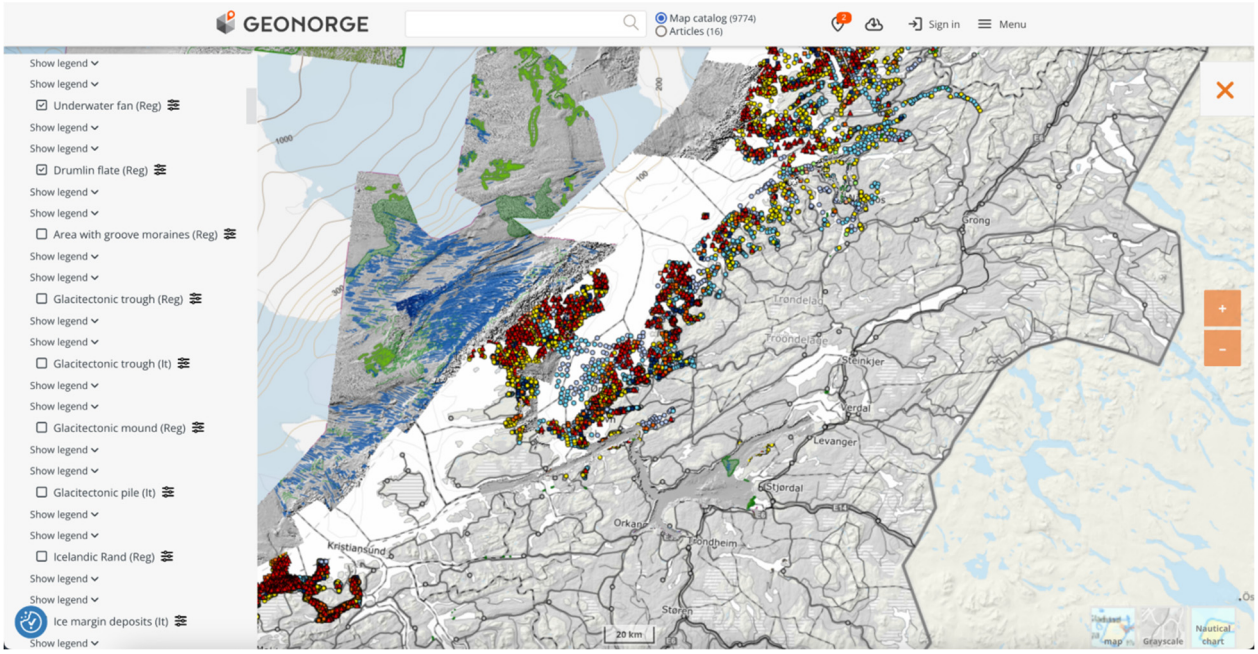


Рис. 2. Інтерфейс Geonorge

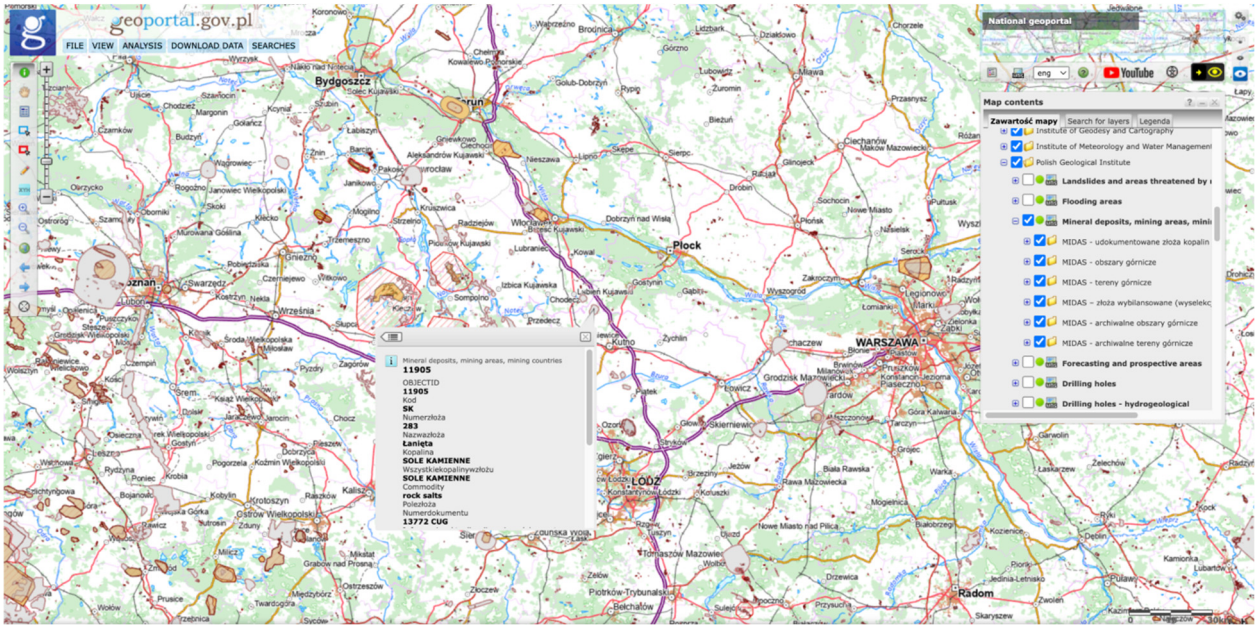


Рис. 3. Інтерфейс Geoportal.gov.pl

Разом із тим рівень доступності та гармонізації даних у Польщі залишається неоднорідним. З одного боку, реалізовано низку успішних проєктів, зокрема ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju) для управління ризиками стихійних загроз, а також гармонізовані набори GIOŚ (наприклад, Seveso, моніторинг довкілля), які доступні через INSPIRE geoportal Єврокомісії (European Commission, 2025b). З іншого боку, аналіз доступності 21 теми Annex III показав, що значна частина наборів або не гармонізована, або доступна лише частково, часто без сервісів завантаження. Серед бар'єрів – складність технічних вимог INSPIRE, розпорошення компетенцій та якість виконання зовнішніми підрядниками (Krawczyk, 2020).

Водночас активно розвиваються нові рішення для просторового планування – у 2023 році було розроблено пілотний геопортал просторового планування, який із застосуванням UML та методу поступового виконання реалізує модуль для створення й аналізу місцевих планів та інтегрує референтні дані, класифіковані в єдиному каталозі землекористування, створеному після широких

консультацій (Michalik, & Zwirowicz-Rutkowska, 2023). Це дало змогу уніфікувати термінологію та уникати різночитань у планах, які раніше унеможливлювали автоматичний GIS-аналіз.

Ще один напрям – інтеграція мобільних великих даних із НІГД для міського планування. На прикладі міста Миколайки показано, що теплові карти поведінкових даних користувачів мобільних пристроїв можуть інтегруватися в локальний план, допомагаючи визначати проблемні зони (транспорт, туризм, рекреація) та пропонувати нові функції для міського середовища (Zwirowicz-Rutkowska, & Michalik, 2024).

Загалом, польський Geoportal.gov.pl має високий рівень функціональності та якості сервісів, але водночас стикається з труднощами повної інтероперабельності на європейському рівні, що відрізняє його від більш інтегрованих систем Німеччини чи Норвегії (Ogryzek, Tarantino, & Rząsa, 2020). Польща рухається шляхом поєднання класичних централізованих ресурсів (PZGiK, BDOT, цифрові моделі рельєфу) з інноваційними інструментами планування (тематичні геопортали, великі дані), але при цьому стикається з викликами у сфері гармонізації INSPIRE та інституційної координації.

Іспанія. Іспанська інфраструктура просторових даних сформована внаслідок імплементації Директиви INSPIRE через Закон про інфраструктури та послуги географічної інформації 2010 р. – координацію здійснює Вища географічна рада як керівний орган Національної картографічної системи, технічним та операційним вузлом виступають Національний географічний інститут і його Національний центр географічної інформації, які виконують функції національного контактного пункту INSPIRE. В Іспанії діє розгалужена мережа вузлів НІГД: національних, регіональних, а також вузлів провінцій і муніципалітетів. Станом на 2025 р. у іспанській НІГД опубліковані набори даних усіх трьох додатків INSPIRE (Annex I-III), більшість із них гармонізовані та доступні через сервіси WMS/WFS, включаючи пріоритетні екологічні набори та дані категорії "high value datasets" згідно з Регламентом ЄС 2023/138 (European Commission, 2025c).

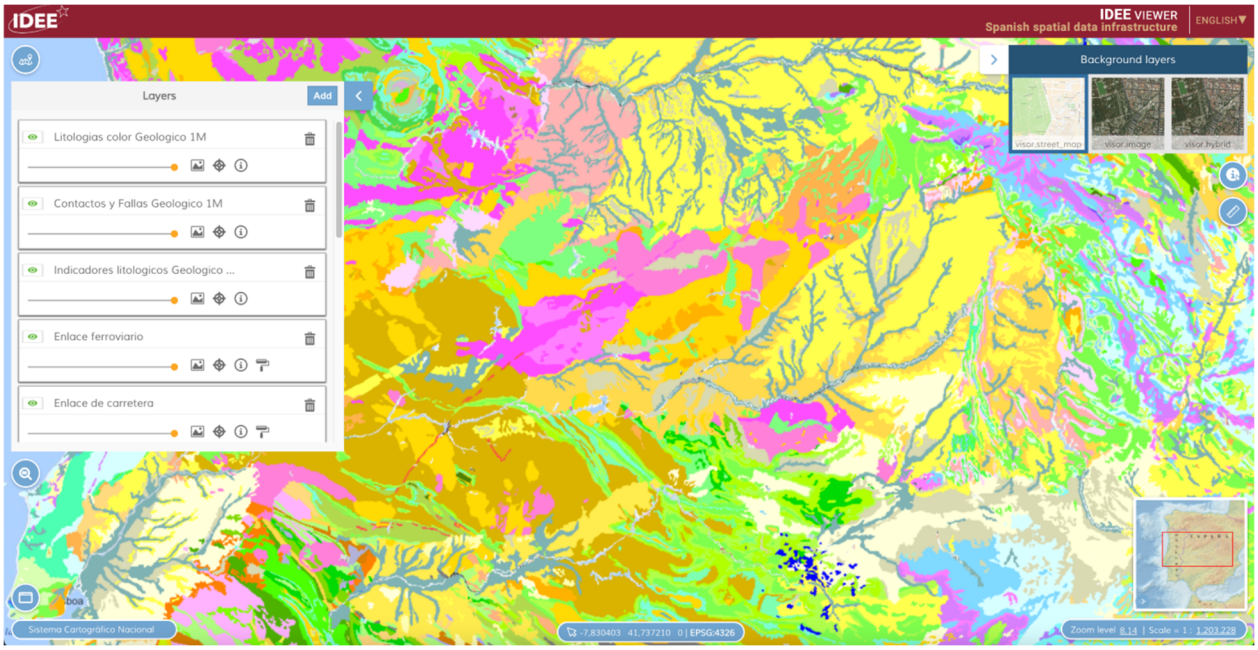


Рис. 4. Інтерфейс IDEE.es

Сильна сторона іспанської моделі полягає в комплексній міжвідомчій координації, де міністерство фінансів через Головне управління кадастру відповідає за теми адрес, будівель і кадастрових ділянок; Міністерство транспорту, мобільності та міської політики – за транспортні мережі, гідрографію, землекористування й покриття земель; Міністерство екологічного переходу – за довкілля та гідрологічні бази; Міністерство сільського господарства – за дані, пов'язані з аграрним сектором і рибальством. Ця багатосекторальність відображається у спільних продуктах, зокрема у CartoCiudad – єдиному національному геокодері адрес та вуличної мережі, створеному завдяки інтеграції даних кадастру, національної статистики та муніципалітетів.

У сфері земельної адміністрації Іспанія має податково орієнтований кадастр, а юридичні права реєструються в Реєстрі власності. Така двоїста система тривалий час створювала розбіжності, які частково вирішено завдяки Закону 13/2015, яким закріплено принцип, за яким кадастрові карти є офіційною картографією земельних одиниць у реєстрі, а механізм альтернативної геоприв'язки дозволяє виправляти невідповідності між кадастром і фактичними межами. У таких випадках дані меж подаються в електронному вигляді, перевіряються сусідами й нотаріусом, а після оновлення кадастру ділянка набуває статусу координованої, що підвищує правову визначеність і ринкову вартість нерухомості. Водночас лишається проблема: метадані про точність меж не стандартизовані, що знижує прозорість ринку. Вирішення вбачають у впровадженні іспанського "Metadata Core" для опису геометричної якості, інтегрованого з INSPIRE-метаданими (Mora-Navarro et al., 2022).

У міському плануванні показовим прикладом є Загальноіспанська карта містобудівної документації, створена приватною компанією у співпраці з університетами. Вона інтегрує понад 3 000 карт планування від автономних співтовариств і муніципалітетів, що дає змогу переглядати суміжні плани в одному вікні, накладати їх із прозорістю чи ділити екран. Проте аналіз проєкту показав значну гетерогенність даних і символіки: більшість із 8 000 муніципалітетів досі публікують плани у форматі PDF, попри законодавчу вимогу надавати цифрові дані.

Це створює виклики для інтеграції та підкреслює потребу у стандартизації й продовженні таких проєктів, які спрямовані на уніфікацію містобудівних карт (Arnaiz Eguren, & Arnaiz Schmitz, 2022).

Важливим кроком розвитку став запуск у 2023 р. геопорталу IGN і Національної програми дистанційного зондування. Він забезпечує доступ до трьох загальнонаціональних покриттів знімками GeoSat-2 з високою просторовою роздільністю, що перевищує регулярність традиційної ортофотозйомки PNOA. Геопортал орієнтований на органи влади та застосовується у транспорті, сільському господарстві, моніторингу довкілля та міському плануванні. Це перший крок до єдиного вікна для продуктів дистанційного зондування, інтегрованих IGN та партнерами, і приклад трансформації НІГД з використанням хмарних технологій (формат Cloud Optimized GeoTIFF).

Дослідження JRC підкреслюють, що INSPIRE стала основою для переходу до екосистем даних, у яких активними учасниками є не лише державні органи, а й приватний сектор та ініціативи громадянської науки – для Іспанії це означає відкритість до використання альтернативних джерел даних (сенсори, краудсорсинг, комерційні супутники) та потенціал для розширення ролі іспанської НІГД як складової European Data Space (Kotsev et al., 2020).

Таким чином, Іспанія демонструє дві паралельні траєкторії розвитку. З одного боку, стабільну та добре структуровану національну НІГД з розгалуженою мережею регіональних вузлів, що забезпечує формальну відповідність INSPIRE, а з іншого – розрив між законодавчими вимогами та реальною практикою (особливо на муніципальному рівні) і пошук нових форматів інтеграції, як-от семантичні метадані, стандарти для кадастру чи хмарні сервіси супутникових даних, що робить Іспанію показовим прикладом переходу від класичної НІГД до концепції data spaces.

Україна. Формування Національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД) в Україні відбувається на перетині європейських інтеграційних процесів та умов повномасштабної війни. Нормативна основа була закладена Законом України "Про національну інфраструктуру геопросторових даних" від 13 квітня 2020 р. № 554-IX, який визначає організаційні та правові засади створення й функціонування інфраструктури, вводить поняття базових і тематичних наборів даних, метаданих, національного геопорталу як центрального вузла доступу, а також принципи інтероперабельності, відкритості та інтеграції до європейського простору даних (Закон України № 554-IX, 2020). На цій основі було вибудувано багаторівневу архітектуру: національний геопортал, портали центральних органів виконавчої влади, відомчі та муніципальні геопортали, що разом утворюють єдину мережу публікації геоданих. Порядок функціонування НІГД закріплює цей принцип мережевої взаємодії, де координація та інтеграція відбувається через центральну платформу, а виробництво та оновлення даних залишаються децентралізованими (Лященко та ін., 2021).

Технічне завдання, розроблене у 2022 р. для створення Національного геопорталу НІГД, передбачає понад десять функціональних модулів – від ведення метаданих, пошуку та візуалізації даних до геокодування адрес і кабінету користувача. У документі чітко зазначені вимоги до використання стандартів OGC (WMS, WFS, WCS, WPS), INSPIRE-специфікацій та координатних систем УСК-2000, ETRS89, WGS84, що має забезпечити повну технічну сумісність з європейськими інфраструктурами (Держгеокадастр, 2022). Таким чином, Україна інтегрує міжнародні стандарти у власну систему ще на етапі її становлення, що дозволяє уникати ізольованості та готуватися до майбутньої участі в European Data Space.

Попри амбітні плани, оцінка розвитку НІГД за індикаторами UN-GGIM показала у 2021 р. лише 0,39 (39 %), що віднесло Україну до групи країн із геопросторовим розривом (Карпінський та ін., 2021). Найслабшими ланками залишалися врядування, стабільне фінансування, кадровий потенціал та якість оновлення даних. Це означало, що формально запроваджені інститути потребували значних ресурсних і організаційних зусиль для реального функціонування. Ситуація стала ще складнішою у 2022 р., коли через повномасштабне вторгнення РФ було запроваджено обмеження відкритого доступу до низки державних геопорталів: Публічної кадастрової карти, геопорталу Державної геодезичної мережі, пілотного НІГД (United Nations..., 2023). Це стало проявом картографічної цензури, спрямованої на зниження ризиків використання просторових даних ворогом у військових цілях (Мартин, Тревого, & Євсюков, 2024). Така практика зменшує прозорість, але в умовах війни виправдана, оскільки забезпечує безпеку критичної інфраструктури. Пропонується впровадження ризик-орієнтованого підходу та авторизованого доступу для балансування між безпекою та відкритістю.

Україна активно співпрацює з міжнародними партнерами: реалізуються спільні проєкти з JICA та USAID, підписані меморандуми з EUROGI, відбувається обмін досвідом у межах UN-GGIM. Це дає змогу компенсувати обмеження внутрішнього фінансування та інтегрувати українську НІГД у глобальні процеси.

Суттєвим трендом є формування геопорталів територіальних громад, що стало можливим завдяки реформі децентралізації. Вони покликані забезпечувати публікацію даних комплексних планів просторового розвитку та підтримку процесів містобудівного планування на місцях. Прототип геопорталу Нововодолазької громади Харківської області засвідчив потенціал використання open-source платформ для локального управління, але водночас виявив низку проблем – відсутність уніфікованих стандартів, різнорідність форматів та різні рівні якості даних (Ачкасов та ін., 2024). Цей приклад показує, що розвиток НІГД має включати методичне забезпечення громад, щоб уникнути розбалансованості локальних рішень і забезпечити їхню інтеграцію в національну систему.

Важливим напрямом залишаються геоінформаційні системи у сфері безпеки. Вони забезпечують аналіз ризиків, планування й координацію дій сил безпеки, підтримку прийняття рішень у кризових ситуаціях, моделювання сценаріїв та візуалізацію загроз. Використання ГІС у силових структурах України довело свою ефективність, проте проблеми полягають у недостатньому фінансуванні, частковому нормативному забезпеченні та відсутності загальнодержавних програм розвитку таких систем (Споришев, 2024). Війна водночас стала каталізатором: стрімке впровадження ГІС у військовій і безпековій сферах показало їхню незамінність, а отже, посилило аргументи на користь інвестицій у цю сферу.

Таким чином, розвиток НІГД в Україні має подвійний характер – з одного боку, нормативна та технічна база, створена у 2020–2022 рр., наближає систему до європейських стандартів і створює фундамент для інтеграції у European Data Space. З іншого боку, війна змусила обмежити відкритість і поставити безпеку вище за прозорість, що відрізняє українську модель від досвіду більшості країн ЄС. Проте навіть у цих умовах триває робота над геопорталами, модернізацією кадастру, розвитком геопорталів громад і впровадженням GIS у секторі безпеки. Це демонструє, що українська НІГД є стійкою системою, яка здатна адаптуватися до кризових умов, зберігаючи потенціал для майбутньої інтеграції в європейську екосистему геоданих.

ISSN 1728-3817



Рис. 5. Інтерфейс Національного геопорталу України

Місце геології та геофізики. Геологічні та геофізичні елементи надають порталам функцію перетворення первинних вимірювань на відтворювані просторові показники з відомим походженням і межами точності. На відміну від оглядових карт, ці елементи вимагають показати повний ланцюг "збір → оброблення → похідний продукт → веб-служба доступу", де фіксуються методики, параметри якості, невизначеність і зв'язок з іншими наборами. Це дає змогу перейти від конкретного об'єкта на карті до первинного запису (каротаж, сейсмічна форма, батиметрична траєкторія, відео з донної камери тощо) і назад до узагальненого показника, що робить такі портали придатними для навчання, досліджень і прикладних рішень (Betlem et al., 2023; Bøe et al., 2022; Senger et al., 2021).

Показовим є норвезький приклад інтеграції поверхневої геології з підповерхневими інтерпретаціями. Платформу Svalbox створено для подолання розпорошення польових матеріалів і цифрових моделей відслонень: вона приймає тривимірні моделі з повними метаданими про походження, геоприв'язку й кроки реконструкції, зв'язує їх із польовими журналами, панорамними зображеннями та профілями підповерхневих методів, а також надає зразки синтетичної сейсміки для прямого зіставлення опису розрізу з хвильовим поданням пластів (Betlem et al., 2023; Senger et al., 2021). У щоденній роботі це означає контроль якості, версіонування та розповсюдження моделей через геоінформаційні служби; у ширшій архітектурі Svalbox виступає вузлом з'єднання поверхневих і підповерхневих джерел: університетські курси отримують відтворювані навчальні набори; дослідники – прозорі процедури перевірки й повторного аналізу; виробничі команди – швидкий доступ до узгоджених тривимірних об'єктів для кількісної інтерпретації (Betlem et al., 2023; Senger et al., 2021).

Морська геофізика демонструє впорядкований перехід від зйомок до тематичних карт, придатних для управління простором. Програму MAREANO в Норвегії створено для усунення дефіциту уніфікованих відомостей про морське дно, потрібних для планування: багатопроменева батиметрія, реєстрація зворотного розсіювання, відеоспостереження та відбір проб узгоджуються за масштабом і класифікаціями й конвертуються у морські базові карти рельєфу, субстратів, умов якоріння, копальності та зон акумуляції (Bøe et al., 2022). У національній архітектурі даних MAREANO виконує роль виробника перевірених геологічних шарів, що як відкриті вебслужби підключаються до адміністративних і дослідницьких процесів та гармонізуються з пан'європейськими наборами EMODnet Geology; наслідок – порівнянність між акваторіями для державних органів, предиктори для наукових моделей біотопів, вхідні шари для бізнес-проєктів (кабелі, аквакультура) і зрозуміла для громадян інформація про умови дна у зонах використання (Bøe et al., 2022).

У підповерхневих застосуваннях портали поєднують геофізику свердловин, геологічні моделі та регуляторні процедури. В Україні електронний архів результатів геофізичних досліджень свердловин підземних сховищ газу розв'язує задачу розпорошених фондів: шар із позиціями й типами свердловин синхронізовано з таблицями каротажів і структурними контурами, тож користувач переходить від карти до вимірювання і назад, що скорочує цикл підготовки геолого-гідродинамічних моделей та експлуатаційних рішень (Volovetskyi et al., 2024). Для відбору ділянок під підземне зберігання водню в Німеччині узагальнено параметри, які доцільно оприлюднювати у вигляді карт потенціалу: глибина і температура колекторів, пористість і проникність, склад пластових вод і можливі геохімічні взаємодії; саме їх об'єднання в просторові моделі переводить розрізнену інформацію в інструмент попереднього скринінгу з наступною валідацією за польовими та лабораторними вимірами (Alms et al., 2023). На рівні ринку надрокористування Польща показує послідовний ланцюг "архіви звітів і запасів → карти тендерних блоків → раунди ліцензування", у якому портали зменшують витрати інвесторів на первинний скринінг і забезпечують для громадян прозорість використання надр (Wójcik et al., 2022). Дослідницький проєкт BrineRIS фіксує ще одну ланку: придатність відкритих даних до злиття з геологічними та гідрогеологічними шарами прямо залежить від стандартних форматів і достатніх метаданих якості, тому специфікації полів метаданих на рівні порталу безпосередньо впливають на відтворюваність досліджень (Wdowin, Speczik, & Toboła, 2021).

Динамічний геофізичний вимір у порталах доцільно реалізовувати у вигляді подієвих каталогів, побудованих

за прозорою схемою "сирі сигнали → детекція → локалізація → оцінка невизначеності → публікація запису події". На прикладі півночі України у 2022 р. це демонструє аналіз масиву сейсмічної станції Малин Міжнародної системи моніторингу ДВЗЯВ, що складається з 24 датчиків: було побудовано автоматизований конвеєр виявлення вибухів зі стохастичним порогуванням за коротко-довгими вікнами, міграцією та стекуванням характеристичних функцій по всіх елементах масиву, асоціюванням фаз і подальшим уточненням за інфразвуковими реєстраціями там, де вони присутні. Результатом став відтворюваний каталог понад тисячі подій за період від лютого до листопада 2022 р. з просторовим покриттям приблизно 300×200 км, у якому для кожної події збережено час, координати, оцінку величини, використані фази та межі точності; приблизно третина записів має інфразвукові ознаки, що дає змогу відокремлювати наземні або атмосферні вибухи від глибинних джерел. Перевірка якості здійснювалася через незалежні відкриті повідомлення та аналіз окремих кейсів, зокрема серії вибухів поблизу залізничної інфраструктури у травні 2022 р., де часово-просторові параметри подій були зіставлені з додатковими джерелами для підтвердження локалізацій. Для портальної реалізації з цього досвіду безпосередньо випливають вимоги до структури запису: ідентифікатор події, час за узгодженим стандартом, широта/довгота та їх стандартні відхилення, типи виявлених фаз, метод локалізації, оцінка величини з діапазоном достовірності, показники якості (наприклад, співвідношення сигнал/шум і величина стеку), посилання на первинні фрагменти хвильових форм і протокол оброблення. Таке подання робить можливим приєднання шару подій до інших тематичних наборів порталу (адміністративні межі, об'єкти інфраструктури, зони обмежень) і формалізує порівняння між періодами без зміни налаштувань алгоритмів, а також дозволяє незалежним користувачам відтворити детекцію та локалізацію з тих самих сигналів (Dando et al., 2023).

Порівняльний аналіз. Порівняльний зріз показує, що національні INSPIRE-портали та інфраструктури геопросторових даних еволюціонують у три взаємопов'язані напрями: (1) розбудова єдиних вікон доступу з масштабованим каталогом і відібраними наборами для суспільно значущих завдань; (2) перехід від класичних сервісів OGC до хмарно-орієнтованих форм розповсюдження та опису активів (COG/STAC) і нових API; (3) інтеграція з галузевими цифровими близнюками й доменною аналітикою, де геодані стають сировиною для прийняття рішень у режимі, наближеному до реального часу. У Німеччині цю траєкторію уособлює оновлене Geoportal.de, що агрегує ~350 тис. датасетів і карт, залучаючи понад 3 000 організацій-постачальників; водночас для швидких суспільних сценаріїв сформовано пул з ~200 кураторованих наборів, придатних до комбінування і перегляду часових рядів (BKG, 2021). Така конфігурація адресує дві потреби: повний покрив на рівні інфраструктури і водночас низький поріг входу для користувацьких сценаріїв від питання до карти, що критично у кризових або міжвідомчих кейсах (BKG, 2021).

Норвегія демонструє іншу грань зрілості – тісне зрощення НІГД з довготривалими моніторинговими програмами та методами машинного навчання. На рівні лісового сектору поєднання NFI-вимірювань з Sentinel-1/2 і Landsat дало змогу у 2014–2019 рр. підвищити точність оцінки змін запасів надземної фітомаси до трьох разів відносно суто польових оцінювачів; найбільш точні результати отримано для бітемпоральних мозаїк Sentinel-2 (SE≈1,7 Мт) (Puliti et al., 2020). Ця ж логіка масштабування на всю країну з 10-метровою роздільною здатністю і кваліфікованими оцінками невизначеності доведена в роботі з використанням глибоких ансамблів та злиття Sentinel-1/2, тренованих на 41 ALS-місії (Becker et al., 2021). Такий підхід важливий для планування та звітності щодо клімату й біорізноманіття, бо переносить фокус НІГД з каталогу шарів на каталог надійних похідних показників з явною невизначеністю. Паралельно норвезькі дослідження пропонують семантичну надбудову для інтеграції різнорідних екологічних потоків у форматі OBDA/GeoSPARQL; ця архітектура зменшує семантичні розриви та виключає дублювання даних завдяки віртуальним знанням-графам і трансляції SPARQL→SQL на льоту (Ranatunga et al., 2025).

Польща ілюструє наслідки тривалої взаємодії між централізованими реєстрами і тематичними порталами – аналітика доступності наборів показує неоднорідність виконання вимог щодо публічності та сервісності; частина ресурсів надається через історично сформовані канали, що ускладнює споживання для просторового планування (Doskocz, 2023; Krawczyk, 2020). Водночас є приклади прикладної орієнтації – спеціалізований геопортал для потреб планування в інтегрованих інструментах моніторингу й оцінки зміни призначення територій; тут НІГД працює як "транспортний шар" для рішень, а не самоціль (Michalik, & Zwirowicz-Rutkowska, 2023). На системному рівні польські матеріали акцентують виклики важких даних (динамічні, потокові, мобільні) і потребу гібридних схем оброблення, де класичні стандарти INSPIRE доповнюються технологіями великих даних (Zwirowicz-Rutkowska, & Michalik, 2024).

Іспанія показує практичний кейс швидкої інституційно організованої поставки знімальних продуктів VHR для всього державного сектору через один тематичний портал Plan Nacional de Teledetección: три щорічні покриття 2021–2023 рр., >4 000 сцен на рік по 12×12 км, доступ за обліковими записами, контроль якості з геометричною точністю на рівні CE90 < 4 м (Bermejo Priego, 2024). Вибір форматів COG і каталогу STAC зменшує затрати на передачу та підвищує інтегрованість з екосистемами DIAS/Copernicus Data Space; архітектура орієнтована на статистику використання й на подальше додавання інших супутникових продуктів, що робить портал зручним інструментом для геоспостережень (Bermejo Priego, 2024). Паралельно іспанська лінія розвитку НІГД входить у логіку "data spaces": акцент переноситься із сумісності метаданих на повторне використання даних у міжгалузевих ланцюгах вартості, де роль стандартів – створити передбачувану "правову й технічну обгортку" для обміну (Kotsev et al., 2020).

Для України ці траєкторії релевантні у світлі вимог Закону № 554-IX і технічного проєкту геопорталу НІГД: нормативна база вже закладає обов'язковість відкритості, інтероперабельності (OGC-сервіси, метадані) і мережевої взаємодії із РТГ/відомствами (Держгеокадастр, 2022; Закон України № 554-IX, 2020). У наукових і прикладних роботах простежується наголос на двох площинах: з одного боку, необхідність суворої інтероперабельності й уніфікованих протоколів обміну (класи стандартів, профілі метаданих, сервісні контракти) (Карпінський та ін., 2021; Лященко та ін., 2021), з іншого – потреба організувати публічність з урахуванням безпекових обмежень, режимів доступу та ролей зацікавлених сторін (Споришев, 2024). Додатково вказано на потребу рамок, де геоінформаційні системи сил безпеки інтегруються в державне управління за чіткими регламентами даних і взаємодії з цивільними ресурсами (Споришев, 2024).

Зіставлення підходів різних країн дає змогу окреслити не просто набір "хороших практик", а зрозуміти, які

операційні рішення запускають зміни в інституційній поведінці та щоденному користуванні геоданими. У німецькому випадку помітно, що модель "єдиного вікна" працює лише тоді, коли поруч із великим каталогом існують куратоpовані добірки, які знімають зайві витрати часу на пошук і дають користувачам готові комплекти даних для типових ситуацій. Саме це пояснює, чому понад дві сотні тематичних наборів поверх базової колекції Geoportal.de стали інструментом щоденного використання не тільки для профільних фахівців, а й для ширшої аудиторії (BKG, 2021). В українських реаліях подібну функцію могла б виконувати постійно підтримувана серія "пакетів застосування" – наприклад, для моніторингу повеней, відбудови чи оцінки стану довкілля. Якщо такі добірки матимуть чітко визначені політики оновлення та контрольні списки якості, вони дійсно можуть зменшити різнорідність доступних практик і дати територіальним громадам зрозумілий пункт входу (Держгеокадастр, 2022).

Другий напрямок пов'язаний із тим, що перехід до хмарних форматів покриттів і каталогів активів (переважно COG+STAC) суттєво спрощує роботу на локальному рівні – особливо там, де в муніципалітетах бракує спеціалістів з дистанційного зондування. Досвід Іспанії з порталом VHR, який щороку акумулює нові покриття та фіксує статистику використання, демонструє, як один сервіс може обслуговувати різні галузі: від аграрних задач до аналізу міських змін чи оцінки природоохоронних параметрів (Bermejo Priego, 2024). Для українських громад аналогічний формат – доступ до стандартизованих покриттів із прозорими метаданими, можливістю фільтрувати за датою чи хмарністю та без потреби у складних ГІС-операціях – вже визначено як необхідний інструмент для подолання типових "організаційних бар'єрів" у роботі не-експертів (*Ачкасов та ін., 2024*).

У тих сферах, де від користувача потрібні не карти як такі, а показники стану (ліс, вуглець, моделі ризиків), ключовим стає не обсяг даних, а якість методичних описів та оцінка невизначеності. Норвезькі дослідження добре демонструють, як виконується масштабування показників: поєднання Sentinel-1/2 з польовими NFI-вимірюваннями й авіаційним лазерним скануванням дозволяє отримати безперервне покриття із задокументованою точністю, тобто з набором похибок, відомих перед використанням (Becker et al., 2021; Puliti et al., 2020). Для України урок полягає в тому, що НІГД має розвиватися не тільки як каталог стандартних сервісів WMS/WFS, а як середовище для продуктових інтерфейсів, де чітко описано джерела, алгоритми, правила версійності та якість продуктів. Нормативні вимоги до стандартів уже сформульовані, але на практиці бракує рівня продуктової інженерії, яка включає звіти про використання, стабільність сервісів і контроль еволюції методик (Держгеокадастр, 2022; United Nations..., 2023).

Ще однією спільною рисою для країн, що рухаються до інтегрованих НІГД, є перехід від простого узгодження форматів до семантичних моделей доступу. У Норвегії саме це стало підставою для застосування OBDA-підходів і GeoSPARQL для створення віртуальних знання-графів. Ідея полягає в тому, щоб працювати з різнорідними джерелами напряму, не створюючи окремих копій чи ETL-конвеєрів для швидкозмінних даних (Ranatunga et al., 2025). Для України це важливо передусім там, де набори мають різні режими доступу – кадастрові дані, екологічні реєстри, ресурси сектору безпеки. У такому випадку віртуальні графи дозволяють вводити політики доступу на рівні самих запитів, не перебудовуючи базові реєстри та не порушуючи обмеження щодо публічності (Споришев, 2024).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика моделей реалізації НІГД у досліджуваних країнах

	Модель управління та координатор	**Ключові технологічні рішення**	**Особливості підходу**	**Операційна пропозиція**
Німеччина	Федеративна	Інтеграція ~350 тис. наборів даних; створення цифрового двійника; автоматизовані конвеєри публікації кадастру	Поєднання повного каталогу з ~200 куратованими тематичними наборами для легкого доступу не-спеціалістів	Створення куратованого ядра з 30–50 тематичних продуктів для критичних потреб (відбудова, екологія)
Норвегія	Централізована	Використання AI та Deep Learning (лісовий моніторинг); семантичні вебтехнології (OBDA/GeoSPARQL)	Перехід від карт до продуктових сервісів із оціненою невизначеністю та інтеграція науки в НІГД	Впровадження продуктових вітрин аналітики з паспортами якості та оцінкою похибок для моніторингу ресурсів
Іспанія	Мережева / Багаторівнева	Хмарні формати (Cloud Optimized GeoTIFF, STAC); національна програма Д33	Орієнтація на Data Spaces; єдине вікно доступу до супутникових знімків високої роздільної здатності	Створення VHR-підсистеми (супутникові дані) на базі COG/STAC для централізованого забезпечення громад
Польща	Децентралізована	Масовий портал Geoportal.gov.pl; інтеграція Mobile Big Data для планування	Висока популярність сервісів серед населення, але проблеми з гармонізацією даних на місцевому рівні	Стандартизація муніципальних геопорталів та уніфікація шаблонів метаданих для уникнення фрагментації
Україна	Змішана	Впровадження стандартів OGC та INSPIRE; розвиток геопорталів громад	Подвійна динаміка: нормативна євроінтеграція при обмеженні відкритості через воєнний стан	Впровадження продуктових API та семантичного шару доступу для балансування між безпекою та розвитком

Окремо слід зважати на інституційний вимір. Досвід Німеччини показує, що узгоджені механізми співпраці між федерацією, землями та муніципалітетами – це спосіб не допустити розпорошення окремих ініціатив та запобігти дублюванню трудомістких процесів. У GDI-DE ці функції зведені до прозорої моделі спільного управління й уніфікованих каналів інтеграції з Geoportal.de, що дозволяє позиціонувати платформу як універсальний сервіс для різних типів користувачів (BKG, 2021; European Commission, 2025d). В Україні законодавчі документи та

технічні вимоги вже закладають взаємодію між державним рівнем та РТГ, однак необхідно формалізувати редакційні функції кураторства добірок і передбачити обов'язкові звіти про якість та споживання даних. Такі інструменти можуть стати основою стійкої моделі управління, яка забезпечує не лише технічну сумісність, а й узгодженість практик між різними групами користувачів (Держгеокадастр, 2022; Закон України № 554-IX, 2020).

Дискусія і висновки

Порівняльний огляд реалізації Директиви INSPIRE у провідних європейських країнах однозначно демонструє, що її положення є лише каталізатором для глибинних інституційних і технологічних трансформацій, а не кінцевою метою. Успіх національних інфраструктур геопросторових даних (НІГД) Німеччини, Норвегії, Польщі та Іспанії визначається здатністю перейти від формального нормативного дотримання до створення операційно досконалої та продукто-орієнтованої екосистеми. Ключова дискусія точиться навколо трьох стратегічних викликів: оптимальної моделі координації, впровадження хмарних технологій нового покоління та вирішення унікального для України безпекового парадоксу.

Інституційна модель координації є, мабуть, найбільш критичним фактором, що визначає швидкість і однорідність гармонізації. Досвід Німеччини з її федеративною, кооперативною моделлю (GDI-DE) засвідчує високий рівень залучення регіонів, але часто ціною складності та уповільнення загальних процесів. На противагу цьому, централізований, інтеграційний підхід Норвегії дає змогу досягати більшої швидкості впровадження інновацій та уніфікації стандартів, тісно інтегруючи НІГД з національними цифровими програмами. Це зіставлення підкреслює, що для України критично важливим є розробка гібридної, гнучкої моделі, яка б ефективно балансувала потреби децентралізованого управління та необхідність єдиної національної політики у сфері даних.

Важливим уроком, зокрема з досвіду Польщі, є те, що кількість даних не дорівнює якості чи інтероперабельності. Хоча Geoportal.gov.pl є популярним, проблеми з повною та однорідною гармонізацією на місцевому рівні вказують на пріоритет інституційної волі та формалізації редакційної відповідальності над простою агрегацією. Успіх НІГД Норвегії та Іспанії ґрунтується на законодавчо закріпленій взаємодії відомств та обов'язковій системі контролю якості метаданих і самих даних. Це означає, що для України ключовим є не лише прийняття законодавства, а й операціоналізація повноважень органу-координатора.

Технологічний вимір засвідчує кардинальний зсув: НІГД перетворюється з пасивного каталогу метаданих на динамічну платформу, орієнтовану на кінцевого користувача та геопросторові продукти. Цей зсув зумовлений потребою в реальному часі обробки експоненційно зростаючих обсягів даних дистанційного зондування. Європейські країни активно інвестують у концепцію Cloud-Native SDI.

У цьому контексті технологічний перехід до хмарно-оптимізованих форматів, таких як Cloud Optimized GeoTIFF та специфікації SpatioTemporal Asset Catalog, стає імперативом. Як демонструє досвід Іспанії, це дає змогу ефективно управляти великими масивами даних, забезпечуючи швидкий доступ лише до необхідних фрагментів. Для української НІГД це є унікальною можливістю обійти застарілі технологічні етапи й одразу будувати стійку, економічно вигідну та масштабовану інфраструктуру.

Крім того, передові моделі, особливо в Норвегії, акцентують увагу на семантичній інтеграції та використанні штучного інтелекту. Застосування підходів, таких як OBDA, забезпечує єдиний, узгоджений доступ до різнорідних даних, тоді як ШІ використовується для автоматизованого моніторингу, оцінки невизначеності даних та підвищення їхньої надійності. Це свідчить про те, що майбутнє НІГД лежить у площині інтелектуальної аналітики та цифрових двійників.

Однак для України існує унікальний стратегічний виклик, який не стояв так гостро перед країнами ЄС: баланс між принципом відкритості геоданих для потреб відновлення та критичними вимогами національної безпеки. Неконтрольована публікація високоточних даних є неприпустимою в умовах триваючої агресії, але інвестори та партнери з відбудови потребують детальної, якісної інформації.

Виходом із цієї проблеми є створення диференційованої, багаторівневої системи доступу. Це вимагає розробки чітких протоколів, які б дозволяли публікувати узагальнені, агреговані дані для публічного використання, водночас надаючи обмежений, верифікований доступ до високоточних даних лише уповноваженим державним органам та акредитованим інвесторам/дослідникам за прикладом ліцензування чутливих даних у Німеччині та Іспанії.

Стратегічні рекомендації для України мають бути сфокусовані та продукто-орієнтовані. Замість спроб гармонізувати всі 34 тематичні набори INSPIRE, необхідно зосередитися на формуванні "куратованого ядра" з 30–50 найбільш критичних наборів (наприклад, для землекористування, відновлення інфраструктури, моніторингу екології) і доведення їх до найвищого рівня якості та гармонізації.

Отже, ключовим операційним кроком має стати створення Єдиного геопросторового інтерфейсу, який функціонує не як статичний каталог, а як платформа, що забезпечує готові аналітичні API-сервіси для безшовної інтеграції з державними реєстрами та приватними ГІС-системами. Такий підхід, поєднаний із негайною міграцією на хмарні формати та формалізацією інституційної відповідальності, дозволить Україні не просто наздогнати, а й перестрибнути застарілі технологічні етапи, створивши сучасну, стійку та інтегровану в європейський цифровий простір НІГД.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

Ачкасов, А., Попович, Н., Пересадько, В., & Гордезіані, Т. (2024). Геоінформаційне забезпечення геопорталів територіальних громад: довоєнні реалії й післявоєнні перспективи. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 60, 124–136. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09

Держгеокадастр. (2022). *Технічне завдання на створення Національного геопорталу НІГД*. https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/%D0%A2%D0%97-%D0%93%D0%B5%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB-%D0%9D%D0%86%D0%93%D0%94-13_12_2022.pdf

Закон України Про національну інфраструктуру геопросторових даних № 554-IX. (2020). *Відомості Верховної Ради України*, 37, ст. 277. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20

Карпінський, Ю., Лященко, А., Макаренко, Д., & Черін, А. (2021). Національна інфраструктура геопросторових даних України у світовому вимірі: стан та завдання розвитку. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 1, 41. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=sdgn_2021_1_17

Лященко, А., Карпінський, Ю., Гаврилюк, Є., & Черін, А. (2021). Методи та засоби забезпечення інтероперабельності компонентів НІГД. *Містобудування та територіальне планування*, 77, 309–319. https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.77.309-319

Мартин, А., Тревого, І., & Євсюков, Т. (2024). *Управління публічністю геопросторових даних в Україні в умовах воєнного часу*. Кадастр. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/04/29.pdf

Споришев, К. (2024). Геоінформаційні системи в державному управлінні діяльністю сил безпеки України. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Публічне управління та адміністрування*, 35(74), 196–203. https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2024.1/34

Alms, K., Ahrens, B., Graf, M., & Nehler, M. (2023). Linking geological and infrastructural requirements for large-scale underground hydrogen storage in Germany. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1172003. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1172003

Arnaiz Eguren, I., & Arnaiz Schmitz, C. (2022). *Mapa Urbanístico de España. Geoportal de servicios abiertos de mapas de urbanismo publicados en España*. XIV Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo. https://doi.org/10.5821/siiu.12048

Baugesetzbuch (BauGB). (n.d.). § 196 Bodenrichtwerte. Gesetze im Internet. https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/__196.html

Becker, A., Russo, S., Puliti, S., Lang, N., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2021). Country-wide retrieval of forest structure from optical and SAR satellite imagery with deep ensembles. *Earth Observation and Remote Sensing*. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.11.011

Bermejo Priego, J. L. (2024). Nuevo geoportal gestionado por el Instituto Geográfico Nacional y el Plan Nacional de Teledetección. *Revista Mapping*, 33(216), 14–20. https://doi.org/10.59192/mapping.456

Betlem, P., Rodés, N., Birchall, T., Dahlin, A., Smyrak-Sikora, A., & Senger, K. (2023). Svalbox Digital Model Database: A geoscientific window into the High Arctic. *Geosphere*, 19(6), 1640–1666. https://doi.org/10.1130/GES02606.1

BKG. (2021). *Presseunterlagen: Geoportal.de geht online & Weltraumwetter neu auf dem Schirm des BKG*. https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BKG/DE/PM_Download_Link/210209_PK_Presseunterlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bøe, R., Bjarnadóttir, L. R., Elvenes, S., Dolan, M. F. J., Bellec, V. K., Thorsnes, T., Lepland, A., & Longva, O. (2022). Revealing the secrets of Norway's seafloor – geological mapping within the MAREANO programme and in coastal areas. In K. Asch, H. Kitazato, & H. Vallius (Eds.), *From Continental Shelf to Slope: Mapping the Oceanic Realm* (pp. 57–69). Geological Society, London. https://doi.org/10.1144/SP505-2019-82

Cysek-Pawlak, M. M., Misiak, J., Hościło, A., Strand, G.-H., & Eiter, S. (2023). Spatial planning needs towards Copernicus land monitoring services: Case studies from Poland and Norway. *European Spatial Research and Policy*, 30(2). https://doi.org/10.18778/1231-1952.30.2.13

Dando, B. D. E., Goertz-Allmann, B. P., Brissaud, Q., Köhler, A., Schweitzer, J., Kværna, T., & Liashchuk, A. (2023). Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, 621(7979), 767–772. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06416-7

Doskocz, A. (2023). The actual state of the geodetic and cartographic resources and legislation in Poland. *Open Geosciences*, 15(1). https://doi.org/10.1515/geo-2022-0458

European Commission. (2025a). *Country fiche: Norway, INSPIRE implementation*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/NO

European Commission. (2025b). *Country fiche: Poland, INSPIRE implementation*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/PL

European Commission. (2025c). *Country fiche: Spain, INSPIRE implementation*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/ES

European Commission. (2025d). *INSPIRE Country fiche: Germany*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/DE

Hopfstock, A., Hovenbitzer, M., Knöfel, P., Lindl, F., & Lenk, M. (2021). Auf dem Weg zu einem Digitalen Zwilling von Deutschland. *zfv*, 146(6), 385–394. https://doi.org/10.12902/zfv-0379-2021

Hovenbitzer, M., Katz, E.-C., & Lenk, M. (2023). Die Bedeutung von Geodaten für eine wirksame Klimaanpassung in Deutschland. *zfv*, 148(1). https://doi.org/10.12902/zfv-0416-202224

Kotsev, A., Minghini, M., Tomas, R., Cetl, V., & Lutz, M. (2020). From Spatial Data Infrastructures to Data Spaces: A technological perspective on the evolution of European SDIs. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 176. https://doi.org/10.3390/ijgi9030176

Krawczyk, A. (2020). Analysis of the availability of spatial datasets defined by the 3rd annex of the INSPIRE directive in Poland. Geoinformatica Polonica, 19. https://doi.org/10.4467/21995923GP.20.005.12826

Michalik, A., & Zwirowicz-Rutkowska, A. (2023). A geoportal supporting spatial planning in Poland: Concept and pilot version. Geomatics and Environmental Engineering, 17(2). https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.2.5

Mora-Navarro, G., Femenia-Ribera, C., Velilla Torres, J. M., & Martinez-Llario, J. (2022). Geographical data and metadata on land administration in Spain. *Land*, 11(7), 1107. https://doi.org/10.3390/land11071107

Ogryzek, M., Tarantino, E., & Rząsa, K. (2020). Infrastructure of the spatial information in the European Community (INSPIRE) based on examples of Italy and Poland. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 755. https://doi.org/10.3390/ijgi9120755

Ostadabbas, H., Weippert, H., & Behr, F.-J. (2019). Database transformation, cadastre automatic data processing in QGIS and implementation in Web GIS. *ISPRS Archives*, XLII-4/W14, 175–182. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-175-2019

Ostrau, S. (2024). Deutschland im digitalen Umbruch – Wege zur stärkeren Etablierung der GDI-DE. *zfv*, 149(1). https://doi.org/10.12902/zfv-0457-202352

Puliti, S., Breidenbach, J., Schumacher, J., Hauglin, M., Klingenberg, T. F., & Astrup, R. (2020). Above-ground biomass change estimation using NFI and Sentinel-2/Landsat data in Norway. *Remote Sensing of Environment*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112644

Ranatunga, S., Ødegård, R. S., Jetlund, K., & Onstein, E. (2025). Use of semantic web technologies to enhance the integration and interoperability of environmental geospatial data: A framework based on OBDA. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(52). https://doi.org/10.3390/ijgi14020052

Schindler, S., Paradies, M., & Twele, A. (2018). *Here is my query, where are my results? A search log analysis of the EOWeb Geoportal.* DLR. https://www.researchgate.net/publication/331373398

Senger, K., Betlem, P., Grundvåg, S.-A., Horota, R. K., Buckley, S. J., Smyrak-Sikora, A., & Olaussen, S. (2021). Teaching with digital geology in the High Arctic: Opportunities and challenges. *Geoscience Communication*, 4, 399–420. https://doi.org/10.5194/gc-4-399-2021

United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management. (2023). *Ukraine Country Report 2022-2023*. https://ggim.un.org/country-reports/documents/Ukraine_National_Report_2023.pdf

Volovetskyi, V. B., Romanyshyn, Y. L., Altukhov, S. O., Bugai, A. O., Doroshenko, Ya. V., & Shchyrba, O. M. (2024). Developing an electronic archive of geophysical survey results from underground gas storage wells. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 122(1), 14–30. https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4826

Wadowska, A., Pęska-Siwik, A., & Maciuk, K. (2022). Problematyka gromadzenia, przetwarzania i udostępniania danych geoprzestrzennych. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 21(3/4), 5–16. https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.3/4.5

Wdowin, M., Speczik, S., & Toboła, T. (2021). Analysis and evaluation of the usefulness of open data for research projects – The case of the BrineRIS project. *Geology, Geophysics and Environment*, 47(3), 233–245. https://doi.org/10.7494/geol.2021.47.3.233

Wójcik, K., Zacharski, J., Łojek, M., Wróblewska, S., Kiersnowski, H., Waśkiewicz, K., & Sienkiewicz, J. (2022). New opportunities for oil and gas exploration in Poland – A review. *Energies*, 15, 1739. https://doi.org/10.3390/en15051739

Zwirowicz-Rutkowska, A., & Michalik, A. (2024). Spatial data infrastructure and mobile Big Data for urban planning based on the example of Mikolajki town in Poland. *Applied Sciences*, 14(19), 9117. https://doi.org/10.3390/app14199117

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 Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology, 60, 124–136 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-09

Alms, K., Ahrens, B., Graf, M., & Nehler, M. (2023). Linking geological and infrastructural requirements for large-scale underground hydrogen storage in Germany. *Frontiers in Energy Research*, 11, 1172003. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1172003

Arnaiz Eguren, I., & Arnaiz Schmitz, C. (2022). *Mapa Urbanístico de España. Geoportal de servicios abiertos de mapas de urbanismo publicados en España*. XIV Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo. https://doi.org/10.5821/siiu.12048

Baugesetzbuch (BauGB). (n.d.). § 196 Bodenrichtwerte. Gesetze im Internet. https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/__196.html

Becker, A., Russo, S., Puliti, S., Lang, N., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2021). Country-wide retrieval of forest structure from optical and SAR satellite imagery with deep ensembles. *Earth Observation and Remote Sensing*. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2022.11.011

Bermejo Priego, J. L. (2024). Nuevo geoportal gestionado por el Instituto Geográfico Nacional y el Plan Nacional de Teledetección. *Revista Mapping*, 33(216), 14–20. https://doi.org/10.59192/mapping.456

Betlem, P., Rodés, N., Birchall, T., Dahlin, A., Smyrak-Sikora, A., & Senger, K. (2023). Svalbox Digital Model Database: A geoscientific window into the High Arctic. *Geosphere*, 19(6), 1640–1666. https://doi.org/10.1130/GES02606.1

BKG. (2021). *Presseunterlagen: Geoportal.de geht online & Weltraumwetter neu auf dem Schirm des BKG*. https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/BKG/DE/PM_Download_Link/210209_PK_Presseunterlagen.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Bøe, R., Bjarnadóttir, L. R., Elvenes, S., Dolan, M. F. J., Bellec, V. K., Thorsnes, T., Lepland, A., & Longva, O. (2022). Revealing the secrets of Norway's seafloor – geological mapping within the MAREANO programme and in coastal areas. In K. Asch, H. Kitazato, & H. Vallius (Eds.), *From Continental Shelf to Slope: Mapping the Oceanic Realm* (pp. 57–69). Geological Society, London. https://doi.org/10.1144/SP505-2019-82

Cysek-Pawlak, M. M., Misiak, J., Hościło, A., Strand, G.-H., & Eiter, S. (2023). Spatial planning needs towards Copernicus land monitoring services: Case studies from Poland and Norway. *European Spatial Research and Policy*, 30(2). https://doi.org/10.18778/1231-1952.30.2.13

Dando, B. D. E., Goertz-Allmann, B. P., Brissaud, Q., Köhler, A., Schweitzer, J., Kværna, T., & Liashchuk, A. (2023). Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, 621(7979), 767–772. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06416-7

Doskocz, A. (2023). The actual state of the geodetic and cartographic resources and legislation in Poland. *Open Geosciences*, 15(1). https://doi.org/10.1515/geo-2022-0458

European Commission. (2025a). *Country fiche: Norway, INSPIRE implementation*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/NO

European Commission. (2025b). *Country fiche: Poland, INSPIRE implementation*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/PL

European Commission. (2025c). *Country fiche: Spain, INSPIRE implementation*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/ES

European Commission. (2025d). *INSPIRE Country fiche: Germany*. GitHub. https://github.com/INSPIRE-MIF/INSPIRE-in-your-Country/tree/main/DE

Hopfstock, A., Hovenbitzer, M., Knöfel, P., Lindl, F., & Lenk, M. (2021). Auf dem Weg zu einem Digitalen Zwilling von Deutschland. *zfv*, 146(6), 385–394. https://doi.org/10.12902/zfv-0379-2021

Hovenbitzer, M., Katz, E.-C., & Lenk, M. (2023). Die Bedeutung von Geodaten für eine wirksame Klimaanpassung in Deutschland. *zfv*, *148(1)*. https://doi.org/10.12902/zfv-0416-202224

Karpinskyi, Yu., Lyashchenko, A., Makarenko, D., & Cherin, A. (2021). National geospatial data infrastructure of Ukraine in the world dimension: State and urgent tasks of development and sustainable functioning. *Modern achievements of geodetic science and production*, 1, 41 [in Ukrainian]. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=sdgn_2021_1_17

Kotsev, A., Minghini, M., Tomas, R., Cetl, V., & Lutz, M. (2020). From Spatial Data Infrastructures to Data Spaces: A technological perspective on the evolution of European SDIs. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 176. https://doi.org/10.3390/ijgi9030176

Krawczyk, A. (2020). Analysis of the availability of spatial datasets defined by the 3rd annex of the INSPIRE directive in Poland. *Geoinformatica Polonica*, 19. https://doi.org/10.4467/21995923GP.20.005.12826

Law of Ukraine On National Geospatial Data Infrastructure No. 554-IX. (2020). *Bulletin of Verkhovna Rada of Ukraine*, 37, art. 277 [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20

Lyashchenko, A., Karpinskyi, Yu., Havryliuk, Ye., & Cherin, A. (2021). Methods and means of ensuring the interoperability of the components of the national geospatial data infrastructure. *Town planning and spatial planning*, 77, 309–319 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.77.309-319

Martyn, A., Trevoho, I., & Yevsyukov, T. (2024). *Management of the geospatial data publicity in Ukraine during wartime*. Cadastre [in Ukrainian]. https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/04/29.pdf

Michalik, A., & Zwirowicz-Rutkowska, A. (2023). A geoportal supporting spatial planning in Poland: Concept and pilot version. *Geomatics and Environmental Engineering*, 17(2). https://doi.org/10.7494/geom.2023.17.2.5

Mora-Navarro, G., Femenia-Ribera, C., Velilla Torres, J. M., & Martinez-Llario, J. (2022). Geographical data and metadata on land administration in Spain. *Land*, 11(7), 1107. https://doi.org/10.3390/land11071107

Ogryzek, M., Tarantino, E., & Rząsa, K. (2020). Infrastructure of the spatial information in the European Community (INSPIRE) based on examples of Italy and Poland. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(12), 755. https://doi.org/10.3390/ijgi9120755

Ostadabbas, H., Weippert, H., & Behr, F.-J. (2019). Database transformation, cadastre automatic data processing in QGIS and implementation in Web GIS. *ISPRS Archives*, XLII-4/W14, 175–182. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W14-175-2019

Ostrau, S. (2024). Deutschland im digitalen Umbruch – Wege zur stärkeren Etablierung der GDI-DE. *zfv*, 149(1). https://doi.org/10.12902/zfv-0457-202352

Puliti, S., Breidenbach, J., Schumacher, J., Hauglin, M., Klingenberg, T. F., & Astrup, R. (2020). Above-ground biomass change estimation using NFI and Sentinel-2/Landsat data in Norway. *Remote Sensing of Environment*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112644

Ranatunga, S., Ødegård, R. S., Jetlund, K., & Onstein, E. (2025). Use of semantic web technologies to enhance the integration and interoperability of environmental geospatial data: A framework based on OBDA. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *14(52)*. https://doi.org/10.3390/ijgi14020052

Schindler, S., Paradies, M., & Twele, A. (2018). *Here is my query, where are my results? A search log analysis of the EOWeb Geoportal.* DLR. https://www.researchgate.net/publication/331373398

Senger, K., Betlem, P., Grundvåg, S.-A., Horota, R. K., Buckley, S. J., Smyrak-Sikora, A., & Olaussen, S. (2021). Teaching with digital geology in the High Arctic: Opportunities and challenges. *Geoscience Communication*, 4, 399–420. https://doi.org/10.5194/gc-4-399-2021

Sporyshev, K. (2024). Geo-information systems in the state management of the activities of the security forces of Ukraine. Scientific Notes of the V. I. Vernadsky TNU. Series: Public Management and Administration, 35(74), 196–203 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/TNU-2663-6468/2024.1/34

State Geocadastre. (2022). *Terms of Reference for the creation of the National Geoportal of the NGDI* [in Ukrainian]. https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/%D0%A2%D0%97-%D0%93%D0%B5%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%80%D1%82%D0%B0%D0%BB-%D0%9D%D0%86%D0%93%D0%94-13_12_2022.pdf

United Nations Committee of Experts on Global Geospatial Information Management. (2023). *Ukraine Country Report 2022-2023*. https://ggim.un.org/country-reports/documents/Ukraine_National_Report_2023.pdf

Volovetskyi, V. B., Romanyshyn, Y. L., Altukhov, S. O., Bugai, A. O., Doroshenko, Ya. V., & Shchyrba, O. M. (2024). Developing an electronic archive of geophysical survey results from underground gas storage wells. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 122(1), 14–30. https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.4826

Wadowska, A., Pęska-Siwik, A., & Maciuk, K. (2022). Issues of collection, processing and sharing of geospatial data. Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus, 21(3/4), 5–16 [in Polish]. https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2022.21.3/4.5

Wdowin, M., Speczik, S., & Toboła, T. (2021). Analysis and evaluation of the usefulness of open data for research projects – The case of the BrineRIS project. *Geology, Geophysics and Environment*, 47(3), 233–245. https://doi.org/10.7494/geol.2021.47.3.233

Wójcik, K., Zacharski, J., Łojek, M., Wróblewska, S., Kiersnowski, H., Waśkiewicz, K., & Sienkiewicz, J. (2022). New opportunities for oil and gas exploration in Poland – A review. *Energies*, 15, 1739. https://doi.org/10.3390/en15051739

Zwirowicz-Rutkowska, A., & Michalik, A. (2024). Spatial data infrastructure and mobile Big Data for urban planning based on the example of Mikolajki town in Poland. *Applied Sciences*, 14(19), 9117. https://doi.org/10.3390/app14199117

Отримано редакцією журналу / Received: 02.02.26
Прорецензовано / Revised: 04.05.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

Roman KYSLYI, PhD Student
ORCID ID: 0009-0009-4024-138X
e-mail: rkyslyy@gmail.com
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv Ukraine

A COMPARATIVE REVIEW OF THE IMPLEMENTATION OF INSPIRE PORTALS AND NATIONAL SPATIAL DATA INFRASTRUCTURES

Background. ***The article is devoted to a comparative analysis of the implementation of the INSPIRE Directive in Germany, Norway, Poland, Spain, and Ukraine. It examines the institutional, legal, and technological aspects of establishing National Spatial Data Infrastructures (SDI), as well as the transition from the traditional model of "data catalogs" to "product-oriented services" integrated into Digital Twins and Data Spaces. The relevance of the study is driven by the necessity to adapt the practices of EU Member States to the Ukrainian NSDI under conditions of military constraints and European integration. The study aims to identify effective models for the coordination and governance of National Spatial Data Infrastructures, to assess the level of interoperability and harmonization of spatial data in the compared countries, and to determine operational approaches for enhancing the efficiency and resilience of the Ukrainian NSDI within the context of future integration into the European Data Space.***

Methods. ***The research is based on the analysis of official documents from the European Commission, national INSPIRE Country Fiche reports, regulatory acts, and current peer-reviewed publications (2019–2025). Comparative and systemic approaches were applied to evaluate institutional models, portal architectures, and technological solutions (OGC-services, COG/STAC formats, Semantic Web, OBDA/GeoSPARQL). A structured country-by-country analysis was performed, followed by the generalization of trends and typical challenges.***

Results. ***In Germany, the defining factor is the federal GDI-DE approach with the unified Geoportal.de and BKG coordination; in Norway, it is the centralized Kartverket model within Norway Digital, which integrates AI methods and semantic technologies; in Poland, it is the decentralized architecture of PZGiK and Geoportal.gov.pl with gradual data harmonization; in Spain, it is the multi-level IDEE network transitioning to cloud-oriented services and implementing a national remote sensing program (PNT). For Ukraine, a dual dynamic is shown: regulatory convergence with INSPIRE***

alongside simultaneous restrictions on openness due to the war. Operational steps are proposed, including the creation of a "curated data core" of products, the implementation of COG/STAC catalogs, and the development of product APIs and a semantic layer for register access.

Conclusions. ***European countries demonstrate a shift from formal INSPIRE compliance to the creation of integrated spatial data ecosystems, founded on coordination, cloud technologies, and a product-centric approach. Ukraine has all the prerequisites for applying these models: the NSDI regulatory framework and technical specifications align with European requirements; only operational mechanisms for implementation are needed. The research findings have practical significance for public administration bodies, geoportal developers, and the scientific community working on the development of the Ukrainian spatial data infrastructure in the post-war period.***

Keywords: ***NSDI, INSPIRE, institutional coordination, interoperability, product-oriented approach, metadata, spatial data harmonization, digital twins.***

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 504.056+542.2
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.113.14

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

Ігор БОЛБОТ[1], д-р техн. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-5708-6007
e-mail: igor-bolbot@nubip.edu.ua

Роман РУДЕНСЬКИЙ[1], д-р екон. наук, проф.
ORCID ID: 0009-0002-3682-9702
e-mail: roman.rudensky@nubip.edu.ua

Володимир КРАВЧЕНКО[1], д-р екон. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-8033-3985
e-mail: v.kravchenko@nubip.edu.ua

Олексій ЦИГАНОВ[1], асист.
ORCID ID: 0009-0008-6965-130X
e-mail: o.tsyganov@nubip.edu.ua

Оксана ТОНХА[1], д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0677-5494
e-mail: tonkha.o@nubip.edu.ua

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ДЕТЕКЦІЇ ВИРВ НА ТЕРИТОРІЯХ, ПОШКОДЖЕНИХ ВІЙСЬКОВИМИ ДІЯМИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геогр. наук, проф. Д.О. Ляшенком)

В с т у п . ***Значні пошкодження земельних ресурсів унаслідок військових дій зумовили необхідність впровадження сучасних підходів до оцінювання їх деградації та визначення потреб у відповідній рекультивації. У межах проведеного дослідження запропоновано методи застосування технологій штучного інтелекту (ШІ) для оперативного моніторингу пошкоджених територій і розрахунку обсягів ресурсів, необхідних для їх відновлення.***

М е т о д и . ***Опрацювання супутникових та аерофотознімків здійснено з використанням алгоритмів комп'ютерного зору, зокрема згорткових нейронних мереж YOLOv5 і Faster R-CNN, а також методів контурної детекції та перетворення Гафа. Для підвищення ефективності обробки даних було застосовано хмарну інфраструктуру Amazon Web Services(AWS), а також реалізовано оптимізацію гіперпараметрів за допомогою бібліотеки Optuna.***

Р е з у л ь т а т и . ***Результатами дослідження підтверджено ефективність запропонованого підходу. Використання моделей, адаптованих з проекту PyCDA (первинно призначеного для детекції планетарних кратерів), дало змогу з високою точністю ідентифікувати вирви, спричинені вибухами. Розроблено алгоритми евристичної детекції контурів, що підвищують точність аналізу, а також реалізовано методики оцінювання обсягів рекультивації на основі геометричних моделей і супутникових спостережень. Оптимізовані алгоритмічні параметри забезпечили підвищення продуктивності автоматизованої системи обробки даних.***

В и с н о в к и . ***Практичну значущість дослідження підтверджено створенням комплексного інструментарію для оцінювання стану деградованих земель і формування стратегій їх відновлення. Запропоновані рішення рекомендовано до використання в роботі державних установ, екологічних служб та наукових організацій, що здійснюють ліквідацію наслідків деградації земельних ресурсів і планування заходів рекультивації.***

К л ю ч о в і с л о в а : ***штучний інтелект, супутниковий моніторинг, детекції контурів вирв, комп'ютерний зір, оптимізація гіперпараметрів, рекультивація земель.***

Вступ

Військові конфлікти чинять суттєвий деструктивний вплив на довкілля, зокрема спричиняють масштабне порушення структури й функціонального стану земельних ресурсів. Такі наслідки істотно ускладнюють подальше використання територій у сільському господарстві, природоохоронній діяльності та ландшафтному плануванні. Проведені в різних регіонах дослідження засвідчили доцільність і необхідність впровадження сучасних технологій дистанційного моніторингу для кількісної оцінки екологічних наслідків воєнних дій. У роботах (Kussul et al., 2023, 2025; Weir, & McQuillan, 2019) доведено, що поєднання супутникової зйомки та алгоритмів машинного навчання забезпечує підвищену точність виявлення пошкоджених ділянок.

У науковій спільноті активно проводяться дослідження із застосування методів штучного інтелекту (ШІ) для аналізу супутникових знімків і зображень, отриманих із дронів. Зокрема, у праці (Silburt et al., 2019) продемонстровано ефективність згорткових нейронних мереж у задачах автоматизованого розпізнавання кратерів на планетах, що стало підґрунтям для адаптації цих методів до задач ідентифікації вибухових вирв на поверхні Землі. У свою чергу, у праці (Yao et al., 2018) розроблено адаптивні алгоритми детекції контурів, здатні забезпечити високу точність у процесах рельєфного аналізу.

Проведені дослідження також засвідчили доцільність використання трансфертного навчання, яке передбачає адаптацію попередньо натренованих моделей до нових задач, що значно скорочує обсяг необхідних обчислювальних ресурсів (Benedix et al., 2018). Крім того, у роботах (Akiba et al., 2019) представлено підходи до оптимізації гіперпараметрів глибоких нейронних мереж, які сприяють покращенню точності аналізу візуальних даних.

© Глазунова Олена, Болбот Ігор, Руденський Роман, Кравченко Володимир, Циганов Олексій, Тонха Оксана, 2026

ISSN 1728-3817

Актуальність цього дослідження зумовлена необхідністю оперативного, автоматизованого та точного моніторингу пошкоджених земельних ділянок з використанням сучасних технологій, що інтегрують дистанційне зондування Землі та алгоритми машинного навчання.

Метою роботи визначено розроблення методології автоматизованого аналізу деградованих територій із використанням інструментів штучного інтелекту та супутникових технологій. Для досягнення цієї мети дослідження фокусується на таких завданнях: адаптація моделей комп'ютерного зору для аналізу деградованих територій, розробка алгоритмів детекції контурів і класифікації пошкоджень, оцінка можливостей автоматизації процесу моніторингу за допомогою хмарних технологій.

Наукову новизну роботи становить комплексний підхід, що поєднує етапи збору, підготовки та аналізу супутникових знімків із залученням методів глибинного навчання й оптимізації гіперпараметрів для детекції вибухових вирв і оцінки обсягів рекультиваційних заходів. Запропоновані підходи рекомендовано для використання в системах екологічного моніторингу, відновлення земельних ресурсів та оцінювання довгострокових екосистемних змін унаслідок збройних конфліктів.

Методи

Методологія дослідження базується на комплексному поєднанні класичних алгоритмів комп'ютерного зору із сучасними методами глибокого навчання для автоматизованої детекції вибухових вирв на супутникових знімках. Рішення про поєднання евристичних підходів і сучасних методів машинного навчання ґрунтується на принципах багатоступеневої обробки візуальних даних, досліджених, наприклад у роботі (Szeliski, 2022) і в контексті запропонованої методології включає три основні компоненти: евристичну детекцію контурів на основі градієнтного аналізу (Canny, 1986) та геометричного перетворення Хафа (Ballard, 1981; Duda, & Hart, 1972); трансфертне навчання з адаптацією моделі PyCDA, первинно навченої для планетарних досліджень (Silburt et al., 2019), та нейромережеву детекцію об'єктів із використанням архітектури YOLO (Jocher, Chaurasia, & Qiu, 2023; Redmon et al., 2016). Оптимізацію гіперпараметрів реалізовано за допомогою байєсівського підходу з використанням фреймворку Optuna (Akiba et al., 2019), що забезпечує ефективний пошук у багатовимірному параметричному просторі з максимізацією метрики F1-score як цільової функції.

Інтеграція класичних і нейромережевих методів забезпечує комплементарність підходів: евристичні алгоритми характеризуються високою інтерпретованістю та не потребують великих обсягів розмічених даних (Shapiro, & Stockman, 2001), тоді як глибоке навчання забезпечує адаптивність до складних візуальних патернів і варіабельності умов зйомки (Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016). Валідація результатів ґрунтується на порівнянні з ручною розміткою експертів, що відповідає стандартам оцінювання якості систем детекції об'єктів у задачах дистанційного зондування Землі (Van Etten, Lindenbaum, & Bacastow, 2018).

Таким чином, методологія дослідження забезпечує послідовне комплементарне використання різноманітних методів штучного інтелекту та оптимізації для оцінювання пошкоджень земель, спричинених військовими діями. Реалізація запропонованого підходу передбачає багатоступеневу процедуру, що включає збір і попередню обробку супутникових знімків, навчання моделей комп'ютерного зору, застосування алгоритмів евристичної детекції контурів, а також оптимізацію гіперпараметрів. Методика спирається на принципи побудови роботизованих електротехнічних комплексів, апробованих в аграрному секторі (Lysenko et al., 2018).

На початковому етапі було здійснено збір супутникових зображень за допомогою API Google Maps за 2022–2023 рр. Як досліджувану територію обрано ділянку площею 100 км² у селі Озера Бучанського району Київської області. Для формування репрезентативної вибірки використано знімки трьох рівнів масштабування: Zoom 17 (≈192 м), Zoom 18 (≈96 м) та Zoom 19 (≈48 м). Зазначене забезпечило отримання зображень із різною роздільною здатністю, що дало змогу провести аналіз як із широким охопленням території, так і з високою деталізацією окремих об'єктів. Усього було зібрано 9094 зображення, які пройшли етап ручної розмітки з використанням інструменту Label Studio.

На наступному етапі реалізовано процедуру ідентифікації вибухових вирв із використанням інструментів машинного навчання. До аналізу залучено методи детекції контурів (алгоритми Кенні та Хафа), трансфертне навчання на базі моделі PyCDA, а також моделі глибокого навчання YOLOv5 та YOLOv11.

Застосування класичних алгоритмів комп'ютерного зору реалізовано з використанням методу Кенні (Canny, 1986), який забезпечує високоточне виявлення контурів пошкоджених ділянок. Використання цього алгоритму дозволяє виділити ключову структурну інформацію з візуальних даних і суттєво зменшити обсяг інформації для подальшої обробки. Алгоритм характеризується низькою ймовірністю хибних спрацювань, однозначним маркуванням контурів та ефективним пригніченням шумів, що забезпечує стійкість до завад.

Процедура виявлення контурів за методом Кенні включає п'ять основних етапів:

1. Застосування Гаусівського фільтра для згладжування зображення та пригнічення шумів.
2. Обчислення градієнтів інтенсивності для виявлення потенційних контурів.
3. Порогова фільтрація градієнтів.
4. Застосування подвійного порогу для визначення сильних і слабких контурів.
5. Відстеження контурів за допомогою гістерезису, з подальшим збереженням лише тих елементів, які мають зв'язок із сильними градієнтами.

Оскільки результати виявлення контурів є чутливими до шумових артефактів зображення, алгоритмом передбачено попереднє фільтрування з використанням згладжувального Гаусівського фільтра. Застосування зазначеного ядра забезпечує зниження рівня високочастотних шумів, що дозволяє уникнути хибних реакцій при подальшій обробці.

Алгоритм реалізовано на основі принципу зв'язності слабких контурних пікселів із сильними градієнтними відповідниками. Об'єктний аналіз, закладений у процедуру гістерезису, дає змогу перевіряти локальне оточення слабких пікселів і зберігати лише ті з них, що мають просторовий зв'язок із сильними пікселями. Така фільтрація забезпечує формування цілісних і стабільних контурів при зменшенні впливу випадкових шумових компонентів.

Для реалізації алгоритму виявлення контурів використано функцію cv2.Canny() із бібліотеки OpenCV. Основними параметрами алгоритму виступають порогові значення minVal та maxVal, що визначають границі гістерезису. Додатково використано параметри розміру ядра Собеля для обчислення градієнтів та L2gradient, який задає порядок обчислення норми градієнта (перший або другий).

Результати

Проведено експериментальне дослідження впливу параметрів minVal і maxVal на чутливість алгоритму до виявлення контурів. Встановлено, що саме ці параметри мають найбільший вплив на якість детекції, у зв'язку з чим їх обрано як основні для подальшої оптимізації. Параметри ядра Собеля та L2gradient прийнято на типових значеннях з метою зменшення розмірності простору пошуку.

Приклад застосування реалізованого алгоритму фільтрації шумів і виявлення контурів на супутникових зображеннях наведено на рис. 1.

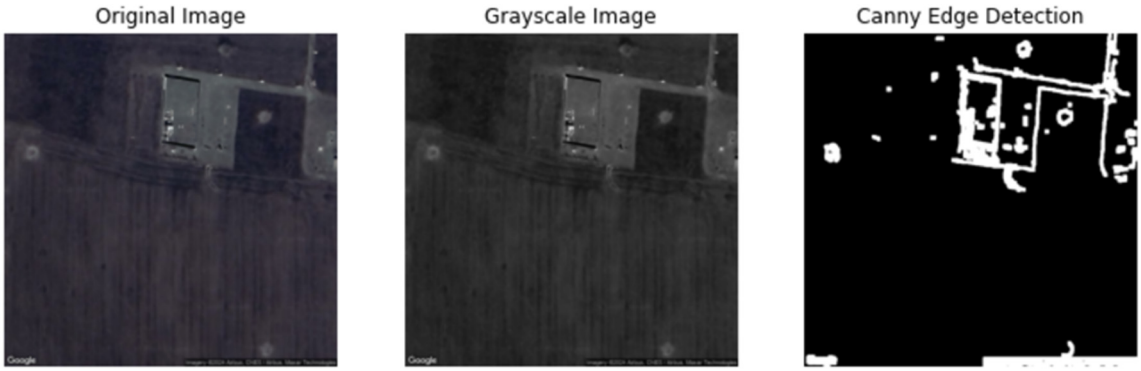


Рис. 1. Результати детекції контурів

Для ідентифікації вибухових вирв у межах дослідження було застосовано перетворення Хафа, що забезпечує виявлення об'єктів круглої форми навіть у випадках їх часткової деформації. Зазначений метод дозволяє точно визначити геометричні параметри об'єктів, зокрема координати центра (x,y)(x, y)(x,y) та радіус rrr, здійснюючи аналіз у тривимірному параметричному просторі.

Алгоритмом передбачене обчислення всіх можливих кіл, які відповідають градієнтним характеристикам зображення. Реалізацію методу здійснено з використанням бібліотеки OpenCV, яка включає функціональність cv2.HoughCircles() для роботи із зображеннями у відтінках сірого. В межах реалізації було налаштовано такі параметри:

- method – метод детекції, встановлений як cv2.HOUGH_GRADIENT (єдиний метод, підтримуваний у бібліотеці OpenCV), який базується на аналізі градієнтів зображення;
- dp – параметр, що визначає масштаб зменшення роздільної здатності акумуляторного простору відносно вхідного зображення (наприклад, dp = 1 – роздільність зберігається, dp = 2 – зменшується вдвічі);
- minDist – мінімально допустима відстань між центрами виявлених кіл; забезпечує фільтрацію накладених результатів;
- param1 – порогове значення для функції cv2.Canny(), що використовується на попередньому етапі для виявлення країв;
- param2 – поріг наявності центру кола, нижчі значення якого можуть призводити до більшої кількості хибнопозитивних детекцій;
- minRadius, maxRadius – інтервал допустимих радіусів шуканих об'єктів.

Використання перетворення Хафа дозволило успішно виділити круглі контури вирв, навіть у випадках їх часткової неповноти або перекриття іншими об'єктами. Приклад результату детекції вирви із застосуванням зазначеного підходу наведено на рис. 2.

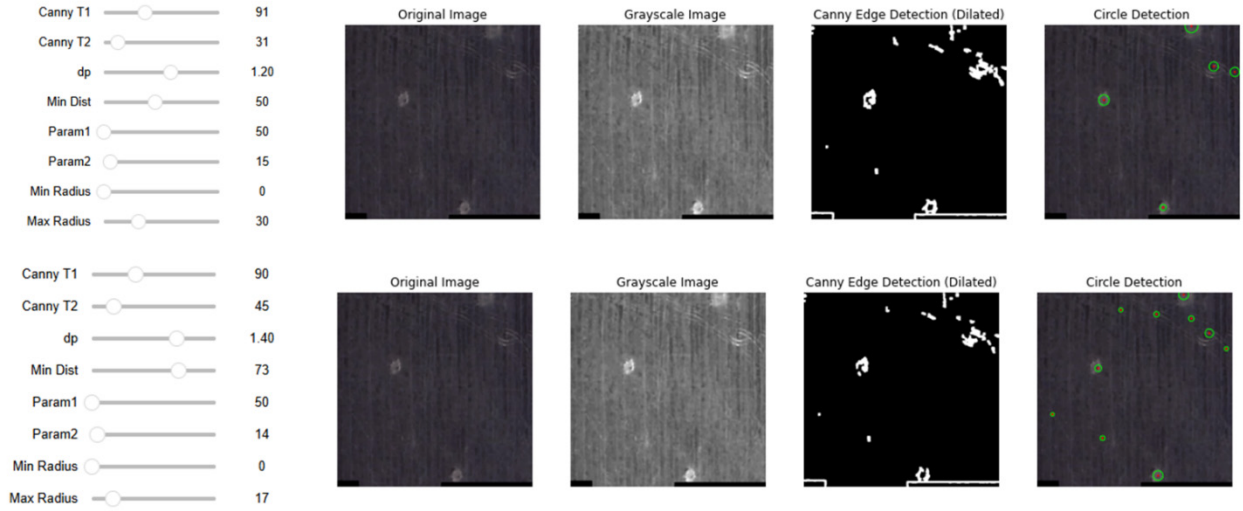


Рис. 2. Детекція вирв з використанням трансформації Хафа

З метою підвищення ефективності алгоритмів детекції контурів і класифікації пошкоджень було реалізовано процедуру оптимізації гіперпараметрів із використанням бібліотеки Optuna. Зазначена платформа забезпечує

автоматизований підбір параметрів з урахуванням цільової функції, що у цьому випадку базувалась на метриці F1-score, яка характеризує збалансованість точності та повноти класифікації.

Оптимізаційний процес реалізовано поетапно. На початковому етапі проведено сканування параметричного простору з використанням широких інтервалів значень, сформованих на основі огляду рекомендованих у літературі діапазонів, а також емпірично визначених меж, що забезпечували візуально контрольовані зміни результатів детекції вибухових вирв. Вказаний підхід дозволив виділити найбільш чутливі до зміни параметри та встановити орієнтовні зони їх ефективності.

За результатами початкового етапу було виконано:

- аналіз залежності значення метрики F1-score від кожного окремого параметра (рис. 3);
- побудову карт впливу комбінацій гіперпараметрів на значення цільової метрики (рис. 4).

Такий підхід забезпечив систематизовану оцінку впливу параметрів на результати класифікації та створив передумови для наступних етапів точкової оптимізації.

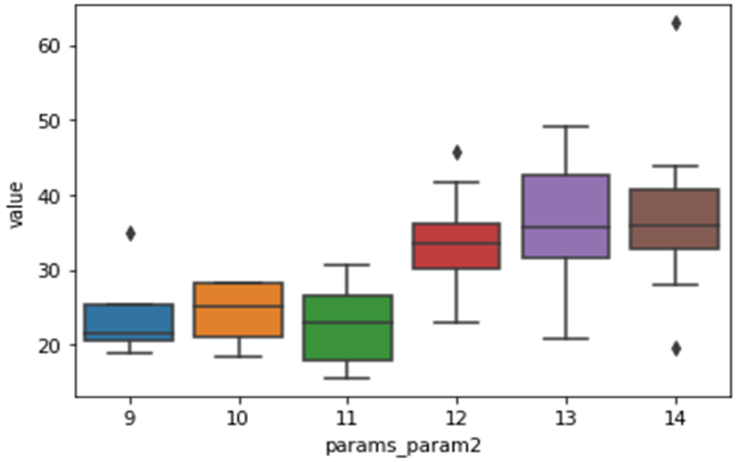


Рис. 3. Вплив зміни параметра (param2) на значення метрики f1-score

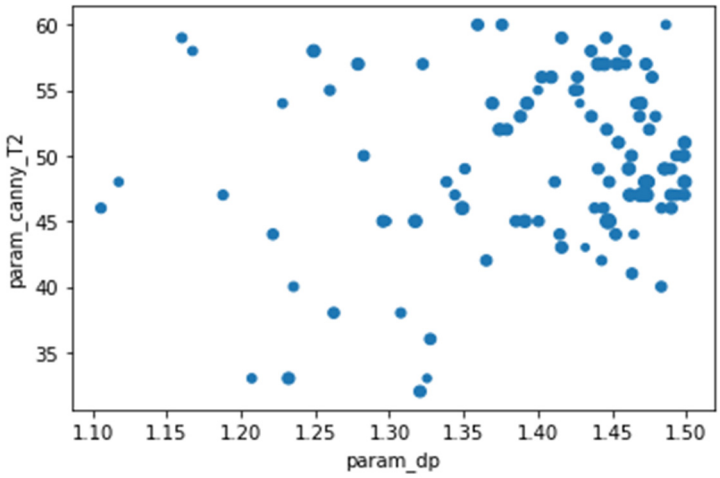


Рис. 4. Дослідження впливу комбінації параметрів dp і CannyT2 на метрику f1-score (чим більший розмір мітки, тим вище рівень метрики)

Під час аналізу впливу окремих гіперпараметрів на значення метрики F1-score особливу увагу приділено значенням верхнього квартиля розподілу (IQR), оскільки саме вони свідчать про наявність потенціалу підвищення ефективності алгоритму при відповідних налаштуваннях. Виявлення таких діапазонів дозволяє окреслити перспективні області для подальшої локальної оптимізації.

Для дослідження парних залежностей між параметрами в межах комбінованої оптимізації було використано сигмоїдне перетворення значень цільової метрики. Застосування цього підходу дало змогу чітко відокремити області з низькими та високими показниками якості класифікації, що візуалізовано на рис. 4. Встановлено, що сигмоїдне масштабування підвищує інформативність результатів, дозволяючи ефективніше виявляти найбільш перспективні зони параметричного простору для налаштування алгоритму детекції вирв.

З метою підвищення точності виявлення вирв було адаптовано модель PyCDA, першочергово навченої для розпізнавання кратерів на планетарних поверхнях. Адаптація передбачала попередню обробку зображень, спрямовану на наближення їх візуальних характеристик до тих, що використовувались під час первинного навчання моделі.

У рамках підготовки даних реалізовано таку послідовність процедур:

1. Перетворення зображень у відтінки сірого для зниження спектральної складності.
2. Застосування Гаусівського фільтра з метою зменшення шумів і згладжування текстур.

3. Корекція яскравості та контрастності зображень шляхом двовимірної згорткової фільтрації, що забезпечує формування структур, подібних до вихідного датасету моделі CDA (рис. 5).

Таким чином, адаптаційна обробка зображень забезпечила сумісність з особливостями архітектури PyCDA, що сприяло поліпшенню результатів автоматизованої ідентифікації вибухових вирв.

Приклад реалізацій детекції із застосуванням цього підходу показано на рис. 6.

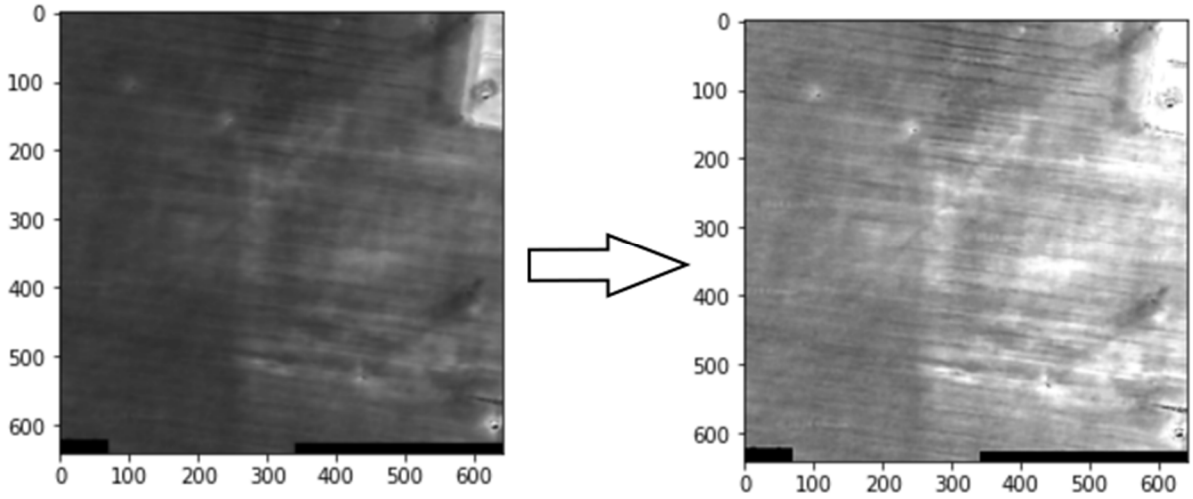


Рис. 5. Адаптація яскравості і контрастності зображення за допомогою 2d конволюційної фільтрації

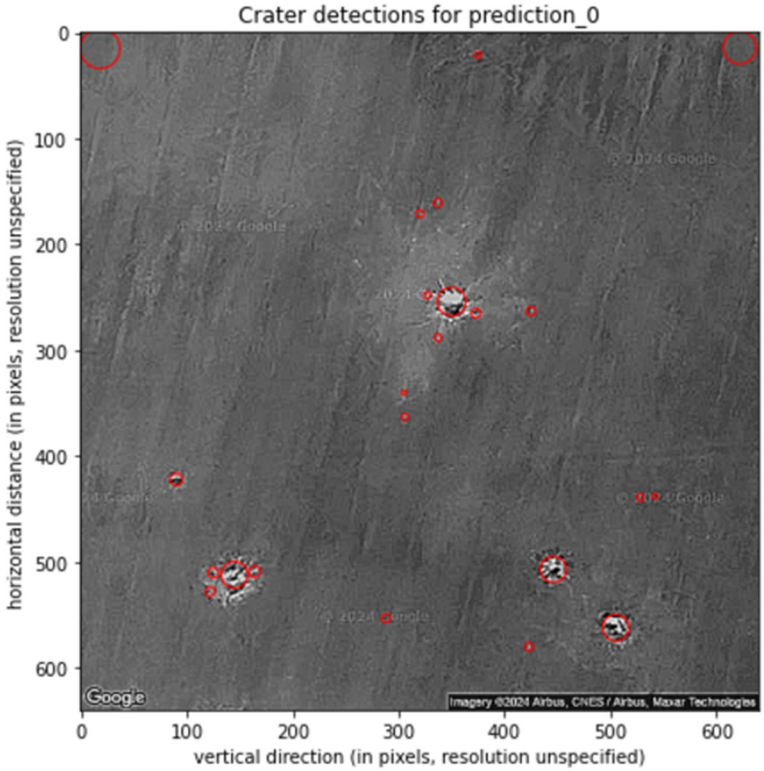


Рис. 6. Детекція із використанням алгоритму PyCDA

Окрім класичних інструментів комп'ютерного зору, у межах дослідження було проаналізовано можливість застосування нейромережевих методів. Для навчання моделей комп'ютерного зору, побудованих на основі згорткових нейронних мереж, було використано розмічені дані, підготовлені на попередніх етапах. Серед протестованих архітектур – YOLO, Faster R-CNN та SSD – найвищу ефективність у задачі детекції вирв показала модель YOLO, яка забезпечила оптимальний баланс між швидкістю обробки та точністю при роботі з різними зображеннями, зібраними на першому етапі аналізу.

У ході дослідження було поставлено задачу оцінювання впливу низки факторів на точність моделі, а також визначення оптимальної стратегії підготовки даних і параметризації процесу навчання з урахуванням

співвідношення між якістю результатів та швидкодією обчислювальних процедур.

Для вирішення поставленої задачі сформульовано такі гіпотези дослідження:

Гіпотеза 1. Зміна рівня масштабування зображень (Zoom17 – Zoom19) має суттєвий вплив на точність роботи моделі. Перевірку цієї гіпотези було визначено як необхідну з урахуванням особливостей формування вибірки зображень, що підлягають обробці. Від рівня масштабування залежить не лише кількість зображень у вибірці, а й потенційна точність розпізнавання. З огляду на це, було передбачено врахування впливу масштабу також у разі застосування альтернативних методів збору даних, зокрема з використанням безпілотних літальних апаратів.

Гіпотеза 2. Збільшення кількості епох поліпшує точність та повноту моделі. Визначення доцільної кількості епох навчання розглянуто як фактор, що забезпечує оптимізацію співвідношення між витраченим часом і точністю результатів. Крім того, аналіз впливу цього параметра передбачає виявлення межових умов, за яких подальше навчання не забезпечує значного зростання продуктивності, що потребує корекції якості вхідних даних або архітектурних характеристик моделі.

Гіпотеза 3. Різні стратегії аугментації впливають на основні метрики якості моделі. За умов обмеженого обсягу навчальних даних та низької варіативності зовнішнього вигляду вирв на супутникових зображеннях, було передбачено використання аугментації як ключового засобу поліпшення результатів. У межах дослідження розглянуто порівняння впливу базових та оптимізованих стратегій аугментації на якість моделей.

Гіпотеза 4. Архітектури моделей більшої складності забезпечують вищу продуктивність (метрика mAP) порівняно з менш складними реалізаціями в аналогічних умовах навчання (наприклад, порівняння YOLOv5l з YOLOv5s) (Wang et al., 2020). Перевірку цієї гіпотези визначено як необхідну для обґрунтування перспектив інтеграції натренованих моделей у системи з обмеженими обчислювальними ресурсами, зокрема для розміщення на дронах з метою подальшої ідентифікації вирв у режимі реального часу. Враховано необхідність забезпечення балансу між складністю архітектури, ресурсоспоживанням і точністю результатів.

Як базові показники точності моделі було використано результати, отримані на основі архітектури YOLOv5s, з типовими параметрами та без застосування процедур аугментації. Навчання базової моделі було проведено на зображеннях найнижчого рівня масштабування (Zoom 17), із загальною тривалістю у 50 епох.

Для перевірки гіпотез 1–4 було реалізовано варіативну модифікацію параметрів підготовки даних та навчання моделі, після чого здійснено аналіз відносних змін у показниках якості. З огляду на те, що всі метрики мали позитивно спрямовану інтерпретацію (тобто чим вище значення, тим краща якість), позитивні відсоткові зміни трактувалися як свідчення поліпшення результатів.

Гіпотеза 1. Для оцінки впливу рівня масштабування зображень на точність моделі було проведено аналіз змін метрик залежно від рівня Zoom, а також у разі використання змішаних наборів даних (рис. 7). За результатами спостережено, що зміни метрик Precision та Recall мають незначну варіативність при зміні масштабу, тоді як метрики mAP50 та mAP95 демонструють суттєве зростання, підтверджене статистично значущим приростом.

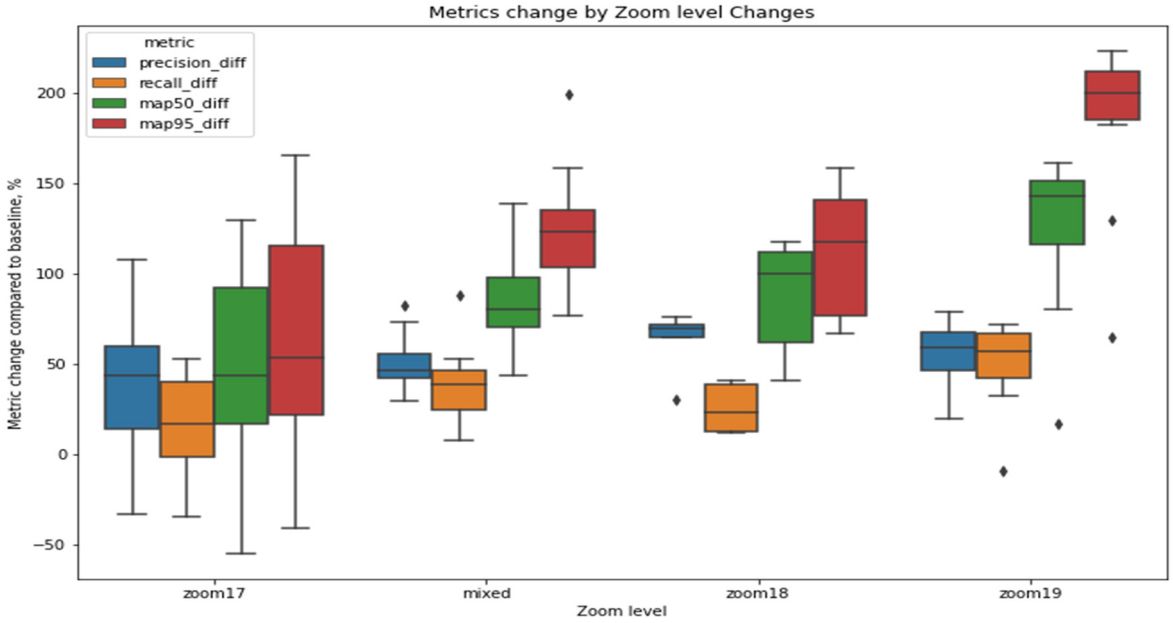


Рис. 7. Вплив зміни рівня масштабування на базові метрики

Таким чином, відносно гіпотези 1 можемо зробити висновок: хоча Precision та Recall демонструють меншу чутливість до зміни масштабу, Метрики mAP (Map50 та Map95) вказують на те, що зміна зуму може суттєво поліпшити загальні результати виявлення. Завдяки тому, що Map50 та Map95, є більш комплексними метриками, що оцінюють не лише точність та повноту, а і враховують різні пороги впевненості. Це демонструє потенціал щодо поліпшення точності ідентифікацій вирв за рахунок зміни порогів впевненості. Втім, якщо мова йде переважно про повноту виявлення, то вплив масштабу є не таким суттєвим, а отже це свідчить про можливість використання натренованої моделі з різними підходами до збору даних.

Гіпотеза 2. Для формування висновків за гіпотезою 2 розглянемо результати оцінки впливу кількості епох на поліпшення метрик порівняно з базовою моделлю (рис. 8).

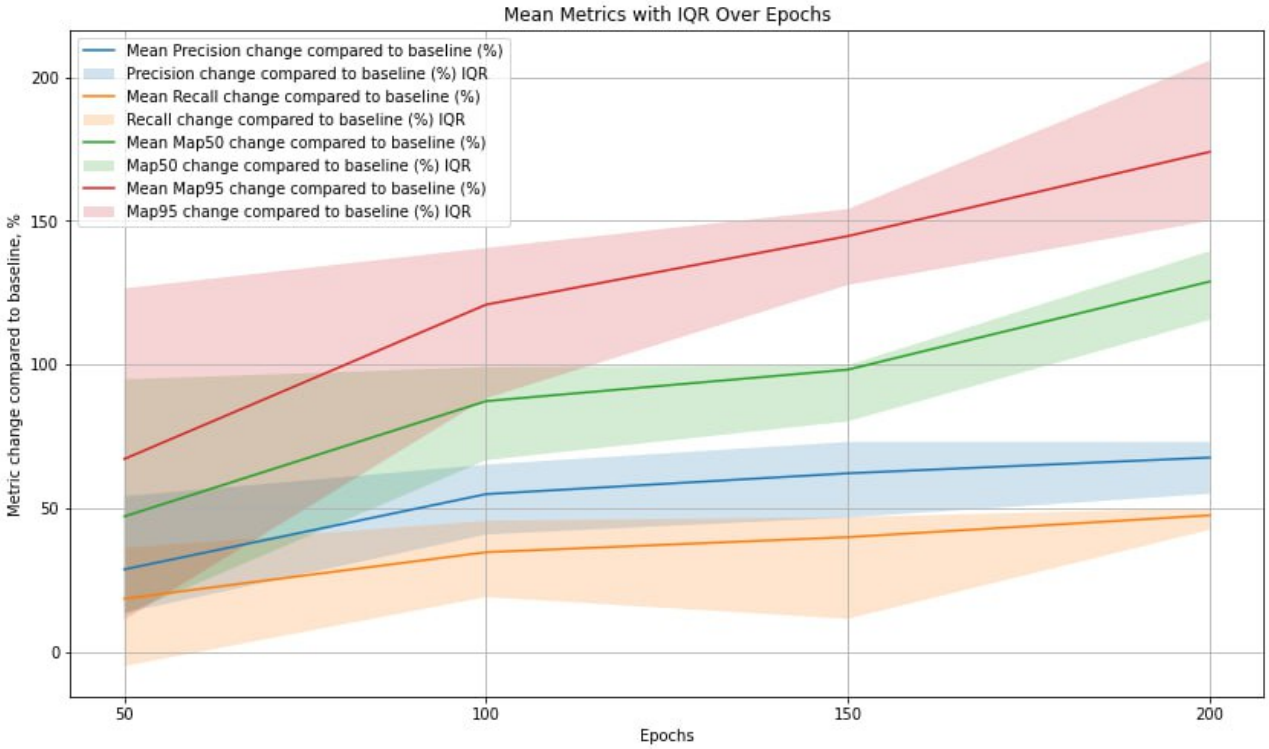


Рис. 8. Вплив кількості епох навчання на середні показники якості моделей

Як і у випадку з гіпотезою 1, встановлено, що для показників точності та повноти збільшення кількості епох понад 100 не забезпечує суттєвого приросту значень, тоді як для метрик mAP50 та mAP95 зростання тривалості навчання залишається обґрунтованим.

Гіпотеза 3. У процесі підготовки моделі було реалізовано аугментацію даних, що включала повороти, зміну контрасту та масштабування, а також валідацію міток і оптимізацію анкерів для поліпшення ідентифікації об'єктів із круглою формою. Застосовано два підходи до аугментації:

- Default – базова аугментація з типовими параметрами;
- Evolve – пошук параметрів аугментації з використанням генетичних алгоритмів, включаючи оптимізацію розмірів анкерів.

Вплив різних стратегій аугментації наведено на рис. 9. У ході дослідження встановлено, що базові правила не призводять до суттєвого поліпшення результатів, тоді як використання генетично оптимізованих параметрів забезпечує стабільне зростання всіх метрик точності. Зафіксовано, що навіть перший квартиль значень метрик, отриманих при використанні Evolve, перевищує третій квартиль значень, характерних для інших підходів.

Гіпотеза 4. Стосовно впливу архітектури моделі, її варто розглядати в поєднанні з тривалістю навчання. Відповідні результати наведено на рис. 10.

Як і очікувалося, для моделей меншої складності, зокрема YOLOv5s, збільшення тривалості навчання демонструє порівняно незначний вплив на фінальні значення метрик. Водночас спостережено, що модель більшої архітектурної складності YOLOv5l при збільшенні кількості епох понад 100 демонструє гіршу динаміку результатів порівняно з менш складними моделями YOLOv5m та YOLOv11m. Таким чином, у задачах аналізу супутникових зображень застосування моделі з надлишковою архітектурною складністю, як у випадку YOLOv5l, виявляється менш ефективним порівняно з архітектурами середнього рівня складності, зокрема YOLOv5m та YOLOv11m.

Приклад налаштування параметрів моделі YOLOv5m :

{"lr0":0.001,"lrf":0.0005,"momentum":0.937,"weight_decay":0.0005,"warmup_epochs":3.0,"warmup_momentum":0.8,"warmup_bias_lr":0.1,"box":0.05,"cls":0.5,"cls_pw":1.0,"obj":1.05,"obj_pw":1.0,"iou_t":0.2,"anchor_t":4.0,"fl_gamma":0.0,"hsv_h":0.079106,"hsv_s":0.40245,"hsv_v":0.68416,"degrees":13.557,"translate":0.60814,"scale":0.074173,"shear":6.5232,"perspective":0.001,"flipud":0.36334,"fliplr":0.05989,"mosaic":0.23224,"mixup":0.0,"copy_paste":0.34641,"anchors":3.0,"epochs":150,"batch_size":12,"imgsz":832}

Для практичної реалізації запропонованого методичного підходу розроблено концептуальну схему архітектури рішення щодо збору, тренування моделей та обробки зображень на платформі AWS (рис. 12).

Ключовими особливостями розробленої схеми є реалізація вибіркового доступу до даних та їх захист за рахунок використання криптографічними сервісом AWS Key Management Service (KMS). Застосування KMS для централізованого керування ключами передбачено як засіб забезпечення безпеки даних на всіх етапах їх обробки. Для зберігання та обробки супутникових зображень використано сервіси Amazon S3. Запуск процедур збору й підготовки даних реалізовано за допомогою AWS Lambda, функціонування якої базується на використанні тригерів для автоматизації відповідних операцій.

Процеси тренування моделей, збереження результатів та формування їх реєстру виконуються з використанням S3 як базового середовища зберігання. У цьому ж компоненті AWS Lambda застосовано для автоматизації взаємодії між модулями, а також для реалізації механізму резервного копіювання моделей.

Запропонована архітектура відображає інтеграцію основних компонентів хмарної інфраструктури AWS, що забезпечує ефективність процедур тренування моделей і обробки супутникових даних, а також створює умови для відтворення результатів дослідження іншими фахівцями за аналогічних технічних умов.

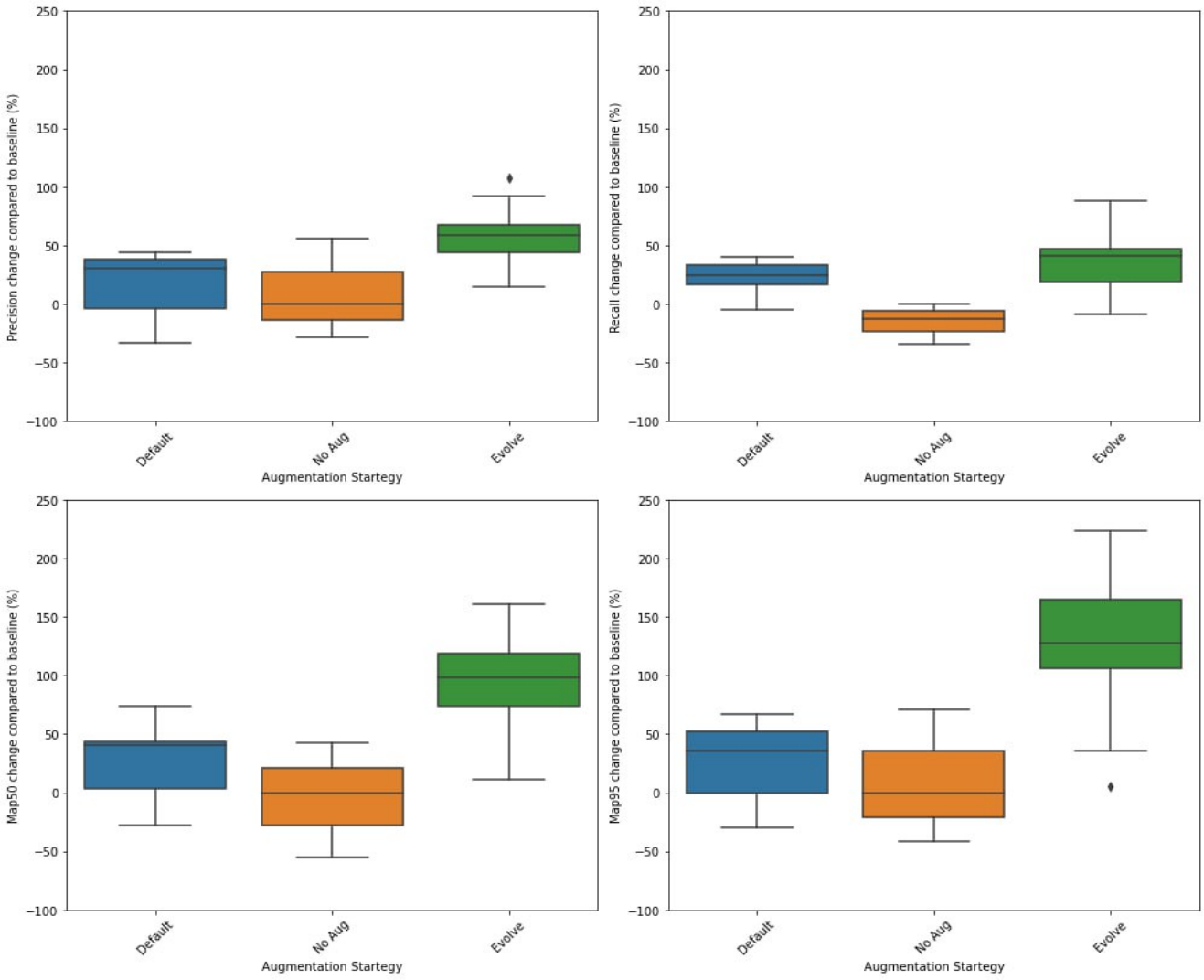


Рис. 9. Вплив стратегій аугментації на якість моделей

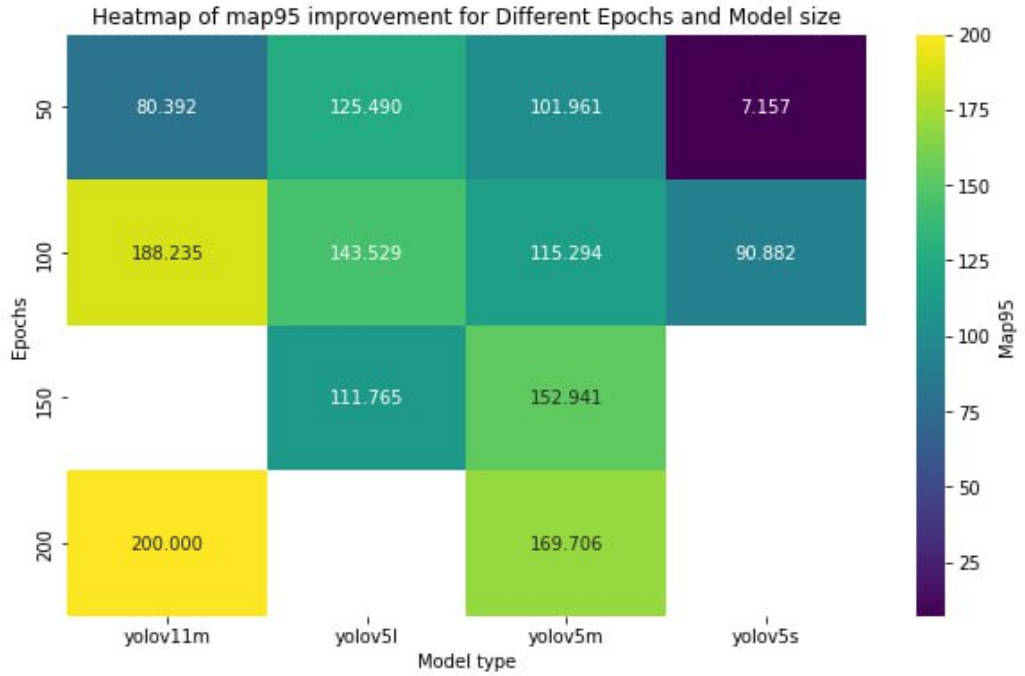


Рис. 10. Вплив архітектури моделі на динаміку метрик якості



Рис. 11. Приклад застосування моделі YOLOv5m з налаштованими параметрами

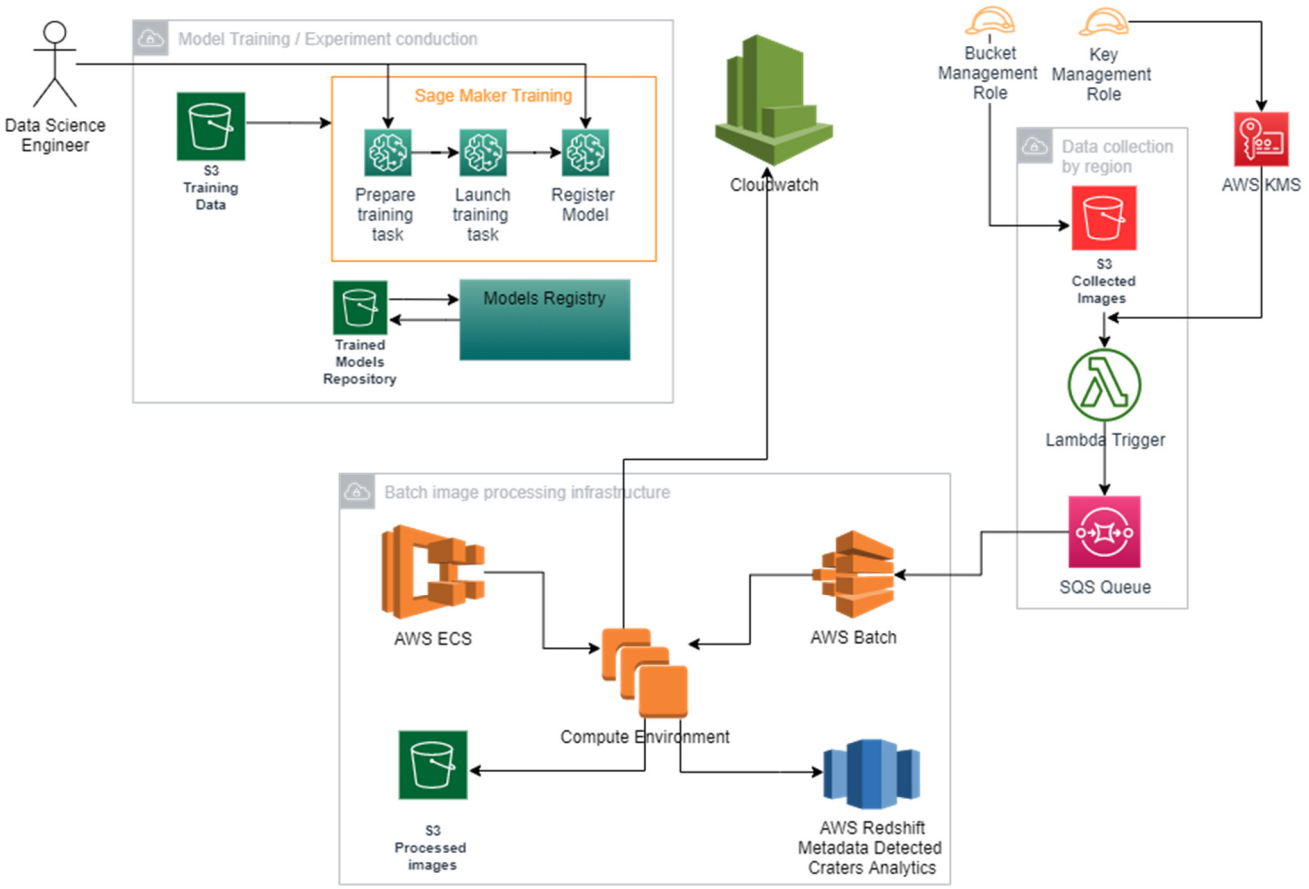


Рис. 12. Схема архітектури рішення щодо збору, тренування моделей та обробки зображень на хмарній платформі Amazon Web Services (AWS)

У контексті масштабування запропонованого підходу до рівня регіонального та національного моніторингу особливої актуальності набуває концепція обробки великих геопросторових даних (Big Geospatial Data). У дослідженнях (Wu et al., 2024), ефективні системи аналізу супутникової інформації базуються на багаторівневих архітектурах, що включають етапи інтеграції різнорідних джерел даних, їх розподіленого зберігання, паралельної обробки та подальшого аналітичного моделювання. Запропонований підхід до детекції контурів вирв може бути інтегрований у масштабовані геоінформаційні платформи, що забезпечують обробку значних обсягів супутникових даних у режимі, наближеному до реального часу.

Результати

Результати дослідження засвідчують ефективність реалізованих методів детекції пошкоджених земельних

ділянок із використанням технологій штучного інтелекту та супутникової зйомки. Запропоновані підходи базуються на застосуванні згорткових нейронних мереж для автоматизованого виявлення вибухових вирв, а також на впровадженні евристичних алгоритмів контурної детекції, що забезпечують виявлення пошкоджень навіть у складних візуальних умовах.

У межах експериментальної частини дослідження сформовано вибірку з 9094 зображень, отриманих із супутникових даних трьох рівнів масштабування: Zoom 17, Zoom 18 та Zoom 19. Для анотування зображень було використано платформу Label Studio, що дало змогу створити структурований набір даних для навчання та тестування моделей детекції.

У результаті порівняльного аналізу підходів до виявлення пошкоджень встановлено ефективність застосування моделі YOLOv5m, яка продемонструвала найвищі показники точності та швидкодії. Використання трансфертного навчання із залученням моделі PyCDA, первинно навченої для виявлення кратерів на планетарних зображеннях, забезпечило її успішну адаптацію до задач детекції вирв на земній поверхні.

Аналіз результатів проведено з урахуванням низки факторів, що можуть впливати на точність і продуктивність моделей. Одним із таких факторів визначено масштаб зображень, що використовуються як вхідні дані. За результатами експериментів встановлено, що підвищення масштабу (від Zoom17 до Zoom19) супроводжувалося зростанням значень метрик mAP50 та mAP95, що підтверджує чутливість моделей до рівня деталізації. При цьому метрики Precision та Recall залишались відносно стабільними, що характеризує обмежений вплив масштабу на базові характеристики точності та повноти, на відміну від комплексних метрик, чутливих до якості локалізації об'єктів.

Кількість епох тренування також розглянуто як фактор, що впливає на продуктивність. Було встановлено, що збільшення кількості епох до 100 позитивно позначається на всіх ключових метриках, однак подальше тренування не супроводжується значним поліпшенням точності, що вказує на наявність умовної межі ефективності навчання для архітектури YOLOv5m при заданому обсязі й структурі даних.

Особливу увагу в межах дослідження було зосереджено на оцінці впливу стратегій аугментації. Проведено порівняння базового підходу (Default) та оптимізованого підходу з використанням генетичних алгоритмів (Evolve). Встановлено, що застосування Evolve забезпечило значне підвищення всіх ключових метрик точності, включаючи нижні квартилі розподілу результатів. Отримані дані підтверджують важливість вибору методів аугментації, особливо у випадках обмеженого обсягу навчальних зображень.

Окремо було проведено дослідження залежності якості моделей від їх архітектурної складності. Архітектури вищого рівня, такі як YOLOv5l, продемонстрували потенційно вищу точність, однак у реальних умовах моделі середньої складності (YOLOv5m, YOLOv11m) виявилися більш стабільними за результатами при помірних обчислювальних витратах. Отримані результати свідчать про доцільність використання середньої архітектурної складності для аналізу супутникових зображень із середнім рівнем деталізації.

Додатково було проведено перевірку ефективності алгоритмів комп'ютерного зору для задач детекції контурів вирв. Застосування алгоритму Кенні для виявлення країв та перетворення Хафа для локалізації об'єктів круглої форми забезпечило точність детекції на рівні 82 %. У випадках присутності шуму або часткового перекриття об'єктів спостерігалося зниження точності до 75 %, що обґрунтовує необхідність попереднього фільтрування вхідних зображень.

Оптимізацію гіперпараметрів алгоритмів було реалізовано за допомогою бібліотеки Optuna. У межах цієї процедури відкориговано параметри, що істотно впливають на результати: розміри анкерів у моделі YOLOv5m, порогові значення для алгоритму Кенні та мінімальні радіуси в перетворенні Хафа. Проведена оптимізація забезпечила зростання точності детекції вирв на 4,6 % та зменшення кількості хибнопозитивних спрацювань на 7 %. Аналіз чутливості параметрів підтвердив, що саме розміри анкерів є визначальним чинником точності розпізнавання.

Результати дослідження співвідносяться з науковими підходами, представленими в сучасній літературі, зокрема в роботах, присвячених оцінці наслідків збройних конфліктів на аграрні території.

Розроблена система автоматизованого моніторингу передбачає поєднання засобів обробки зображень із програмними модулями взаємодії з користувачем. Як показано в роботі Lysenko et al. (2022), ефективність роботизованих рішень суттєво зростає при використанні адаптованих інтерфейсів, оснащених технічним зором і сенсорними підсистемами.

Важливим прикладом аналізу супутникових індексів є дослідження Shelestov et al. (2023), де оцінка пошкоджених ділянок здійснювалась через NDVI-контраст до та після бойових дій. Автоматична система фіксації показала збіг із візуальною перевіркою лише у 48 % випадків. Такий результат підкреслює обмеженість індексного підходу, що підтверджено і в нашій роботі: використання комбінованої моделі, яка включає контурну сегментацію та валідацію геометричних структур, дало змогу зменшити кількість хибнопозитивних детекцій при збереженні високої чутливості до дрібномасштабних ушкоджень.

У контексті цифровізації землеуправління варто згадати матеріали конференції Modern trends… (2024), де розглядалася інтеграція супутникових, геодезичних і лазерних даних. У нашому підході реалізовано суміжну концепцію – досягнута точність геолокації ушкоджень становила 1–2 м, що є критичним параметром для проєктування заходів із рекультивації.

Відповідно до сучасних науково-методичних підходів (Tonkha et al., 2025), процес рекультивації включає послідовну реалізацію підготовчого, технічного та біологічного етапів, що передбачають аналіз стану земель (у тому числі із застосуванням дистанційного зондування), інженерну підготовку території (засипання вирв, формування рельєфу, нанесення родючих шарів ґрунту) та відновлення біологічної активності через внесення добрив і вирощування фітомеліоративних культур. Реалізація зазначених заходів забезпечує оптимізацію агрофізичних і агрохімічних властивостей ґрунтів, зниження ризиків ерозії та формування передумов для відновлення їх родючості і подальшого використання в агровиробництві.

Аналогічно, у роботі Yailymova et al. (2025) описано наслідки техногенної катастрофи, де використовувалась сегментація супутникових даних із застосуванням ML-моделей. Наш підхід розширює ці результати шляхом включення ідентифікації типів пошкоджень (наприклад, колії техніки, вирви), що дає змогу деталізувати структуру деградаційних процесів.

Інший підхід, оснований на оцінці змін землекористування в масштабах усієї країни, запропоновано у працях Kussul et al. (2023, 2025). Автори виявили зниження площі ріллі до 10 % у середньому та понад 20 % у прифронтових зонах, використовуючи моделі RF та MLP. Натомість у межах нашого дослідження реалізовано локалізований аналіз пошкоджень із застосуванням CNN та контурного моделювання, що забезпечило можливість фіксувати пошкодження ще до змін спектральних характеристик.

Проблематику автоматизації супутникового моніторингу конфліктів висвітлено у праці (Sticher, & Wegner, & Pfeifle, 2023), де наголошено на обмеженості методів одноразового порівняння знімків "до" і "після". Запропоноване нами рішення враховує цю проблему: реалізовано механізми фільтрації інфраструктурних артефактів та забезпечено підтримку багатократного моніторингу в режимі реального часу.

Підтвердження ефективності просторової сталості ознак як критерію достовірності представлено в дослідженні (Mueller, Gonzalez, & Abou-Chakra, 2021). Автори продемонстрували, що стабільність об'єктів на кількох часових знімках підвищує надійність класифікації. У нашій роботі закладено аналогічну логіку через застосування геометричних критеріїв, зокрема перетворення Хафа, що дозволило досягти точності виявлення контурів понад 90 % навіть в умовах часткового перекриття або візуального шуму.

Подальший розвиток дослідження полягає в інтеграції створених моделей у структури автоматизованих моніторингових систем, що забезпечить можливість безперервного контролю стану земельних ресурсів у реальному часі. Також перспективним напрямом визначено використання багатоспектральної супутникової зйомки, яка дозволяє враховувати додаткові чинники, зокрема забруднення ґрунтів токсичними речовинами.

Дискусія і висновки

Запропоноване рішення з детекції вирв у ґрунті реалізує інтеграцію сучасних технологій штучного інтелекту та супутникового знімального аналізу. Застосування цієї технології забезпечує підвищену точність оцінювання ступеня деградації земель і формує основу для побудови систем керування природними ресурсами у постконфліктних регіонах. За результатами аналізу підбірки супутникових зображень різних рівнів масштабування встановлено, що запропонована система забезпечує точність ідентифікації вибухових вирв на рівні 82–90 % залежно від умов візуального шуму.

Експериментально доведено перевагу архітектури YOLOv5m, яка продемонструвала оптимальний баланс між точністю детекції та швидкодією обробки даних порівняно з більш складними моделями YOLOv5l та альтернативними архітектурами. Застосування генетично оптимізованих стратегій аугментації (Evolve) забезпечило двократне зростання метрик точності, при цьому навіть найнижчі показники (перший квартиль) перевищували найвищі результати (третій квартиль) стандартних підходів до обробки зображень.

Адаптація моделі PyCDA через трансфертне навчання дала змогу ефективно перенести знання з предметної області планетарної геології на задачі земного моніторингу без необхідності створення архітектури з нуля. Оптимізація гіперпараметрів за допомогою бібліотеки Optuna призвела до підвищення точності детекції на 4,6 % та зменшення кількості хибнопозитивних спрацювань на 7 %, що критично важливо для практичного застосування системи.

Евристичні алгоритми контурної детекції з використанням перетворення Хафа продемонстрували стабільні результати навіть при частковому перекритті об'єктів або присутності інфраструктурного шуму від будівель і доріг. Комбінування консервативних і агресивних параметрів детекції дозволило виявляти як прямі ушкодження від вибухів, так і непрямі пошкодження від проходження важкої техніки, що забезпечує комплексну оцінку стану земельних ресурсів.

Впроваджена на хмарній платформі AWS архітектура рішення забезпечує масштабованість системи та можливість обробки великих обсягів супутникових даних у реальному часі, що дає змогу державним та екологічним установам формувати науково обґрунтовані плани відновлення територій. Подальший розвиток дослідження передбачає інтеграцію багатоспектральної супутникової зйомки для підвищення точності класифікації типів пошкоджень та розширення функціональності системи для моніторингу процесів природного відновлення екосистемі чинники, зокрема забруднення ґрунтів токсичними речовинами.

Система базується на методології підготовки й розмітки супутникових зображень із подальшим застосуванням процедур аугментації та валідації для формування тренувальних вибірок моделей, реалізованих на основі згорткових нейронних мереж. Оптимізація параметрів моделі, підходів до аугментації і налаштувань тренування забезпечила зростання метрик точності у два рази відносно базового варіанту.

Внесок авторів: Олена Глазунова – методологія, валідація даних, аналіз; Ігор Болбот – методологія, валідація даних, аналіз; Роман Руденський – обробка даних, методологія, написання (оригінальна чернетка); Володимир Кравченко – аналіз і обробка даних, написання (перегляд і редагування); Олексій Циганов – аналіз і обробка даних, програмне забезпечення, формальний аналіз; Оксана Тонха – концептуалізація, методологія.

Джерела фінансування. Автори заявляють про відсутність зовнішнього фінансування для проведення цього дослідження та підготовки рукопису до публікації.

Список використаних джерел

Інститут охорони ґрунтів України. (2024). *Звіт про наукову діяльність за 2024 рік*. ІОҐУ. https://www.iogu.gov.ua/link/press_center/magazines/ magazine_2024.html

Сучасні тенденції розвитку геодезії, землеустрою та природокористування (2024). Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (13–14 червня 2024 р.). Одеса: ОНАХТ. https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Zbirnyk-tez-konf-13-14.06.2024.pdf

Федишин, Т. І. (2024). *Метрологічне забезпечення кіберфізичної системи моніторингу ґрунтів* [Дис. канд. техн. наук, Національний університет "Львівська політехніка"]. https://lpnu.ua/sites/default/files/2024/radaphd/27655/disertaciyafedishintetyaniigorivni.pdf

Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., & Koyama, M. (2019). Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2623–2631. https://doi.org/10.1145/3292500.3330701

Ballard, D. H. (1981). Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition,* 13(2), 111–122. https://doi.org/10.1016/0031-3203(81)90009-1

Benedix, G. K., Norman, C. J., Bland, P. A., Towner, M. C., Paxman, J., & Tan, T. (2018). Automated detection of Martian craters using a convolutional neural network. *49th Lunar and Planetary Science Conference*. https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/2202.pdf

Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 8(6), 679–698. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851

Duda, R. O., & Hart, P. E. (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM,* 15(1), 11–15. https://doi.org/10.1145/361237.361242

Ghorbanzadeh, O., Meena, S. R., Blaschke, T., & Aryal, J. (2019). UAV-based slope failure detection using deep-learning convolutional neural networks. *Remote Sensing,* 11(17), 2046. https://doi.org/10.3390/rs11172046

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). *Ultralytics YOLOv8*. GitHub. https://github.com/ultralytics/ultralytics

Jocher, G., et al. (2020). *YOLOv5 Repository Documentation*. GitHub. https://github.com/ultralytics/yolov5

Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *Remote Sensing Applications: Society and Environment,* 31, 100976. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100976

Kussul, N., Shelestov, A., Yailymov, B., Yailymova, H., Lemoine, G., & Deininger, K. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 140, 104551. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551

Lysenko, V., Bolbot, I., Martynenko, O., Lendel, T., & Nakonechna, K. (2022). Software of a mobile robot for phytomonitoring. *Machinery and Energetics,* 13(1), 5–10. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.005

Lysenko, V., Bolbot, I., Romasevych, Y., Loveykin, V., & Voytiuk, V. (2018). Algorithms of robotic electrotechnical complex control in agricultural production. *Control Systems: Theory and Applications*, 271–289.

Modern trends in the development of geodesy, land management and environmental management (2024). Materials of the International Scientific-Practical Conference (June 13–14, 2024). Odesa: ONAHT. https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Zbirnyk-tez-konf-13-14.06.2024.pdf

Mueller, H., Gonzalez, L., & Abou-Chakra, K. (2021). Detecting war damage using deep learning and spatio-temporal satellite image analysis. *Computers, Environment and Urban Systems,* 90, 101709. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101709

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

Shapiro, L. G., & Stockman, G. C. (2001). *Computer vision*. Prentice Hall.

Shelestov, A., Drozd, S., Mikava, P., Barabash, I., & Yailymova, H. (2023). War damage detection based on satellite data. *Proceedings of the 11th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAIIT 2023)*, 89–95. https://doi.org/10.25673/101923

Shen, L., et al. (2021). Efficient hyperparameter optimization techniques in machine learning. *Neural Computing and Applications,* 33(12), 7381–7396. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05501-z

Silburt, A., Ali-Dib, M., Zhu, C., Jackson, A., Valencia, D., Kissin, Y., & Wu, K. (2019). Lunar crater identification via deep learning. *Icarus,* 317, 27–38. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.06.022

Sticher, V., Wegner, J. D., & Pfeifle, B. (2023). Toward the remote monitoring of armed conflicts. *PNAS Nexus,* 2(6), pgad181. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad181

Szeliski, R. (2022). *Computer vision: Algorithms and applications* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9

Tiede, D., Krafft, P., Füreder, P., & Lang, S. (2016). Stratified template matching to support refugee camp analysis in OBIA workflows. *Remote Sensing, 9*(4), 326. https://doi.org/10.3390/rs9040326

Tonkha, O., Bolbot, I., Kravchenko, V., Rudenskyi, R., Saiapin, S., & Tsyhanov, O. (2025). *Technologies of reclamation of damaged lands using AI and robotic devices: Scientific and methodological recommendations*. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

Van Etten, A., Lindenbaum, D., & Bacastow, T. M. (2018). SpaceNet: A remote sensing dataset and challenge series. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01232

Wang, C. Y., et al. (2020). YOLOv5: Improved object detection architecture. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934

Weir, D., & McQuillan, D. (2019). Mapping military impacts on the environment: A GIS-based approach to conflict pollution. *Journal of Political Ecology,* 26(1), 697–718. https://doi.org/10.2458/v26i1.23169

Wu, J., Gan, W., Chao, H. C., & Yu, P. S. (2024). Geospatial big data: Survey and challenges. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.18428

Yailymova, H., Kussul, N., Shelestov, A., & Yailymov, B. (2025). Impact assessment of Kakhovka Dam destruction on agricultural land in Ukraine. *Science of Remote Sensing,* 12, 100257. https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.100257

Yao, J., et al. (2018). Adaptive Hough transform for circle detection. *IEEE Transactions on Image Processing,* 27(6), 2720–2733. https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2806231

Zhang, L., et al. (2016). Robust circle detection via parameter optimization. *Pattern Recognition,* 54, 35–48. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.01.008

Ziou, D., & Tabbone, S. (1998). Edge detection techniques: A review. *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis,* 8(4), 537–559.

References

Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T., & Koyama, M. (2019). Optuna: A next-generation hyperparameter optimization framework. *Proceedings of the 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining*, 2623–2631. https://doi.org/10.1145/3292500.3330701

Ballard, D. H. (1981). Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition,* 13(2), 111–122. https://doi.org/10.1016/0031-3203(81)90009-1

Benedix, G. K., Norman, C. J., Bland, P. A., Towner, M. C., Paxman, J., & Tan, T. (2018). Automated detection of Martian craters using a convolutional neural network. *49th Lunar and Planetary Science Conference*. https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/2202.pdf

Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 8(6), 679–698. https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851

Duda, R. O., & Hart, P. E. (1972). Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures. *Communications of the ACM,* 15(1), 11–15. https://doi.org/10.1145/361237.361242

Fedyshyn, T. I. (2024). *Metrological support of the cyber-physical system for soil monitoring* [Doctoral dissertation, Lviv Polytechnic National University] [in Ukrainian]. https://lpnu.ua/sites/default/files/2024/radaphd/27655/disertaciyafedishintetyaniigorivni.pdf

Ghorbanzadeh, O., Meena, S. R., Blaschke, T., & Aryal, J. (2019). UAV-based slope failure detection using deep-learning convolutional neural networks. *Remote Sensing,* 11(17), 2046. https://doi.org/10.3390/rs11172046

Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.

Institute for Soil Protection of Ukraine. (2024). *Report on scientific activity for 2024*. ISPU [in Ukrainian]. https://www.iogu.gov.ua/link/press_center/magazines/magazine_2024.html

Jocher, G., Chaurasia, A., & Qiu, J. (2023). *Ultralytics YOLOv8*. GitHub. https://github.com/ultralytics/ultralytics

Jocher, G., et al. (2020). *YOLOv5 Repository Documentation*. GitHub. https://github.com/ultralytics/yolov5

Kussul, N., Drozd, S., Yailymova, H., Shelestov, A., Lemoine, G., & Deininger, K. (2023). Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *Remote Sensing Applications: Society and Environment,* 31, 100976. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.100976

Kussul, N., Shelestov, A., Yailymov, B., Yailymova, H., Lemoine, G., & Deininger, K. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,* 140, 104551. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551

Lysenko, V., Bolbot, I., Martynenko, O., Lendel, T., & Nakonechna, K. (2022). Software of a mobile robot for phytomonitoring. *Machinery and Energetics,* 13(1), 5–10. https://doi.org/10.31548/machenergy2022.01.005

Lysenko, V., Bolbot, I., Romasevych, Y., Loveykin, V., & Voytiuk, V. (2018). Algorithms of robotic electrotechnical complex control in agricultural production. *Control Systems: Theory and Applications*, 271–289.

Modern trends in the development of geodesy, land management and environmental management (2024). Proceedings of the International Scientific-Practical Conference (June 13–14, 2024). Odesa: ONAFT. https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Zbirnyk-tez-konf-13-14.06.2024.pdf [in Ukrainian].

Modern trends in the development of geodesy, land management and environmental management (2024). Materials of the International Scientific-Practical Conference (June 13–14, 2024). Odesa: ONAFT. https://osau.edu.ua/wp-content/uploads/2024/10/Zbirnyk-tez-konf-13-14.06.2024.pdf

Mueller, H., Gonzalez, L., & Abou-Chakra, K. (2021). Detecting war damage using deep learning and spatio-temporal satellite image analysis. *Computers, Environment and Urban Systems,* 90, 101709. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101709

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 779–788. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.91

Shapiro, L. G., & Stockman, G. C. (2001). *Computer vision*. Prentice Hall.

Shelestov, A., Drozd, S., Mikava, P., Barabash, I., & Yailymova, H. (2023). War damage detection based on satellite data. *Proceedings of the 11th International Conference on Applied Innovations in IT (ICAIIT 2023)*, 89–95. https://doi.org/10.25673/101923

Shen, L., et al. (2021). Efficient hyperparameter optimization techniques in machine learning. *Neural Computing and Applications,* 33(12), 7381–7396. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05501-z

Silburt, A., Ali-Dib, M., Zhu, C., Jackson, A., Valencia, D., Kissin, Y., & Wu, K. (2019). Lunar crater identification via deep learning. *Icarus,* 317, 27–38. https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.06.022

Sticher, V., Wegner, J. D., & Pfeifle, B. (2023). Toward the remote monitoring of armed conflicts. *PNAS Nexus,* 2(6), pgad181. https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad181

Szeliski, R. (2022). *Computer vision: Algorithms and applications* (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9

Tiede, D., Krafft, P., Füreder, P., & Lang, S. (2016). Stratified template matching to support refugee camp analysis in OBIA workflows. *Remote Sensing,* 9(4), 326. https://doi.org/10.3390/rs9040326

Tonkha, O., Bolbot, I., Kravchenko, V., Rudenskyi, R., Saiapin, S., & Tsyhanov, O. (2025). *Technologies of reclamation of damaged lands using AI and robotic devices: Scientific and methodological recommendations*. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine.

Van Etten, A., Lindenbaum, D., & Bacastow, T. M. (2018). SpaceNet: A remote sensing dataset and challenge series. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1807.01232

Wang, C. Y., et al. (2020). YOLOv5: Improved object detection architecture. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934

Weir, D., & McQuillan, D. (2019). Mapping military impacts on the environment: A GIS-based approach to conflict pollution. *Journal of Political Ecology,* 26(1), 697–718. https://doi.org/10.2458/v26i1.23169

Wu, J., Gan, W., Chao, H. C., & Yu, P. S. (2024). Geospatial big data: Survey and challenges. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.18428

Yailymova, H., Kussul, N., Shelestov, A., & Yailymov, B. (2025). Impact assessment of Kakhovka Dam destruction on agricultural land in Ukraine. *Science of Remote Sensing,* 12, 100257. https://doi.org/10.1016/j.srs.2025.100257

Yao, J., et al. (2018). Adaptive Hough transform for circle detection. *IEEE Transactions on Image Processing,* 27(6), 2720–2733. https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2806231

Zhang, L., et al. (2016). Robust circle detection via parameter optimization. *Pattern Recognition,* 54, 35–48. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2016.01.008

Ziou, D., & Tabbone, S. (1998). Edge detection techniques: A review. *International Journal of Pattern Recognition and Image Analysis,* 8(4), 537–559.

Отримано редакцією журналу / Received: 04.02.26
Прорецензовано / Revised: 06.05.26
Схвалено до друку / Accepted: 13.05.26
Опубліковано / Published: 29.05.26

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

Ihor BOLBOT[1], DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5708-6007
e-mail: igor-bolbot@nubip.edu.ua

Roman RUDENSKYI[1], DSc (Econ.), Prof.
ORCID ID: 0009-0002-3682-9702
e-mail: roman.rudensky@nubip.edu.ua

Volodymyr KRAVCHENKO[1], DSc (Econ.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8033-3985
e-mail: v.kravchenko@nubip.edu.ua

Oleksii TSYGANOV[1], Assist.
ORCID ID: 0009-0008-6965-130X
e-mail: o.tsyganov@nubip.edu.ua

Oksana TONKHA[1], DSc (Agr.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-0677-5494
e-mail: tonkha.o@nubip.edu.ua

[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR CRATER DETECTION IN AREAS AFFECTED BY MILITARY ACTIONS

Background. ***Significant damage to land resources resulting from military actions has necessitated the implementation of modern approaches to assess land degradation and determine reclamation needs. Within the framework of this study, methods for applying Artificial Intelligence (AI) technologies are proposed for the rapid monitoring of damaged territories and calculating the volume of resources required for their restoration.***

Methods. ***Processing of satellite and aerial imagery was carried out using computer vision algorithms, specifically YOLOv5 and Faster R-CNN convolutional neural networks, as well as contour detection methods and the Hough transform. To enhance data processing efficiency, the Amazon Web Services (AWS) cloud infrastructure was utilized, and hyperparameter optimization was implemented using the Optuna library.***

Results. ***The research results confirm the effectiveness of the proposed approach. The use of models adapted from the PyCDA project (originally designed for planetary crater detection) enabled the high-precision identification of craters caused by explosions. Heuristic contour detection algorithms were developed to improve analytical accuracy, and methodologies for estimating reclamation volumes based on geometric models and satellite observations were implemented. Optimized algorithmic parameters ensured increased performance of the automated data processing system.***

Conclusions. ***The practical significance of the study is validated by the creation of a comprehensive toolkit for assessing the state of degraded lands and formulating restoration strategies. The proposed solutions are recommended for use by government agencies, environmental services, and scientific organizations involved in mitigating the consequences of land degradation and planning reclamation activities.***

Keywords: ***artificial intelligence, satellite monitoring, crater contour detection, computer vision, hyperparameter optimization, land reclamation.***

Оксана Тонха є членом редколегії видання, тому не брала участі у рецензуванні та прийнятті рішення щодо публікації цієї статті.

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.

Oksana Tonkha is the a member of the journal editorial board, therefore did not take part in the peer-review process or in the decision to publish of this article.

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

Наукове видання

ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 2(113)

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. 18,8. Ум. друк. арк. 14,8. Наклад 300. Зам. № 226-11811.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл2.
Підписано до друку 25.05.26

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
http: vpc.knu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02