# ВІСНИК
## КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

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

**ГЕОЛОГІЯ** **4(111)/2025**

**Засновано 1958 року**

**УДК 504+550+551+552+624**
**DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.110**


**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)**; 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"**
**16.12.25 (протокол № 6)**

**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 3, SJR 0.238), 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", 2025**

# BULLETIN

## TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

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

**GEOLOGY** **4(111)/2025**

**Established in 1958**

**UDC 504+550+551+552+624**
**DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.110**


**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)**; 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) |



| | |
|---|---|
| **ddress** | **USI "Institute of Geology"**<br>**90, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022**<br>**☎ (38044) 521 33 38**<br>**e-mail: geology.bulletin@knu.ua, geolvisnyk@ukr.net**<br>**web: https://geology.bulletin.knu.ua** |
| **Approved by** | **the Academic Council of the USI "Institute of Geology"**<br>**16.12.25 (protocol № 6)** |
| **Registered by** | **the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine**<br>**Decision № 1089 of 28.03.24**<br>**Identifier of printed media: R30-03800** |
| **Certified by** | **the Ministry of Education and Science of Ukraine (category A)**<br>**Order № 1412 dated 18.12.18** |
| **Indexing** | **Scopus (Quartile 3, SJR 0.238), 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**<br>**Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University"**<br>**Certificate of entry into the State Register**<br>**ДК № 1103 dated 10.31.02** |
| **Address** | **PPC "Kyiv University"**<br>**14, Taras Shevchenko blvd., Kyiv, 01601**<br>**☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28**<br>**e-mail: vpc@knu.ua** |



**© Taras Shevchenko National University of Kyiv,**
**Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University", 2025**

# ЗМІСТ

## ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

**ШЛАПІНСЬКИЙ Володимир, ПАВЛЮК Мирослав, ЛАЗАРУК Ярослав, САВЧАК Олеся, ТЕРНАВСЬКИЙ Мирослав**
Новий погляд на геологічну будову ділянки Борислав–Модричі–Трускавець Українських Карпат і Передкарпаття ..... 5

## ГЕОФІЗИКА

**ВИЖВА Сергій, ОНИЩУК Віктор, ОНИЩУК Іван, РЕВА Микола, ШАБАТУРА Олександр**
Електричні параметри карбонатних порід Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища Глинсько-Солохівського газоконденсатного району ..... 18

**ПЕТРОКУШИН Роман, БЕЗРОДНИЙ Дмитро, БАНКАЛА Джузеппе, ДЕ ЛУКА Лучіана**
Виявлення границь геологічних об'єктів методом аналізу відношення похідних гравітаційного поля на прикладі Передкарпатського прогину ..... 26

**АХМЕДОВ Тофік, ХАЛІЛОВА Лала**
Вуглеводнева перспективність родовища Зих, пов'язана з пліоцен-міоценовими відкладеннями з огляду на нові дані 3D сейсморозвідки (Апшеронський нафтогазоносний район, Азербайджан) ..... 33

## МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

**ПАВЛЮК Олександра, ПАВЛЮК В'ячеслав, СЕМЕНІВ Олег**
Рутил із корінних порід південно-західної частини Українського щита ..... 41

## ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

**БОНЧКОВСЬКИЙ Олександр, ОСТАПЕНКО Павло, ЖУКОВА Ярослава, КРАВЧУК Ілля, ПЕТРИЩЕНКО Сергій, ЛАЗАРЕЦЬ Аделіна, ГАЛАГАН Олександр, СТЕПАНЕНКО Назар**
Забруднення ґрунтів важкими металами внаслідок ведення бойових дій: результати з тестової ділянки у Миколаївській області ..... 51

**БЕРЕЗОВСЬКИЙ Олексій, МІДИК Світлана, КОРНІЄНКО Валентина, САМКОВА Оксана, ТОНХА Оксана, ВІШОВАН Юрій, СЕМЕНЕНКО Лариса, СМИРНИЙ Максим**
Оцінка забруднення поліциклічними ароматичними вуглеводнями мулу і ґрунту Дністровського каньйону в межах Городенківської територіальної громади ..... 58

## ГЕОЛОГІЯ НАФТИ І ГАЗУ

**АЛІЄВА Судабе**
Геодинамічний та палеотектонічний аналіз Південнокаспійської мегадепресії у зв'язку з перспективами нафти і газу (на прикладі Євлах-Агджабединської западини) ..... 65

**МАМЕДОВ Гусейнага, АБДУЛЛА-ЗАДЕ Мурад, ПОГОРЄЛОВА Олена**
Каспійський піонер: структурна складність і розподіл вуглеводнів у шельфовому родовищі Нафтові камені ..... 75

**НАСІБОВА Гультар, ЗЕЙНАЛОВА Севіль**
Моделювання оптимізації розробки на родовищі Балахани-Сабунчу-Рамана (V горизонт) ..... 88

## ГЕОІНФОРМАТИКА

**ТРЕТЯК Антон, ТРЕТЯК Валентина, КАПІНОС Наталія, СТРЕЛЬНИК Вікторія, ПЕТРОВА Наталія**
Формування природно-екологічного каркасу землекористування на регіональному рівні в контексті забезпечення екологічної стійкості: методичні та методологічні підходи ..... 96

**ВИЖВА Зоя, ДЕМИДОВ Всеволод, ВИЖВА Андрій, ШОВКОПЛЯС Тетяна**
Статистичне моделювання даних в 3D області з варіограмою типу пентамодель для геофізичного моніторингу Рівненської АЕС ..... 104

**ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій, ВОРОХ Віктор, ГЛОБА Ольга, ЛЯЩЕНКО Олеся, СЮЙВА Ірина**
Застосування методів машинного навчання та даних ДЗЗ дистанційного зондування Землі в прогнозуванні врожайності ..... 114

**АГАКІШІЄВА Гюнеш, ДЖАБРАЙЛОВ Еміль, МАММАДОВА Джахан**
Просторово-часовий аналіз теплового комфорту в Азербайджані ..... 122

## ЕКОНОМІЧНА ГЕОЛОГІЯ

**ВИЖВА Сергій, БІЛЯВСЬКА Ольга, БАБЧУК Дмитро, БАБЧУК Юлія**
Критичні матеріали в контексті програми Ukraine facility та європейської інтеграції України ..... 131

## ОГЛЯД

**КРІЛЬ Тетяна, СТРЕЛЬЦОВ Антон**
Інженерно-геологічні умови дніпровських схилів центрального ареалу Києва: ретроспектива досліджень та аналіз чинників зсувної небезпеки ..... 137

# CONTENTS

## GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

**SHLAPINSKY Volodymyr, PAVLYK Myroslav, LAZARUK Yaroslav, SAVCHAK Olesya, TERNAVSKYI Myroslav**
A new look at the geological structure of the Boryslav–Modrychi–Truskavets section of the Ukrainian Carpathians and Precarpathians ..... 5

## GEOPHYSICS

**VYZHVA Serhii, ONYSHCHUK Viktor, ONYSHCHUK Ivan, REVA Mykola, SHABATURA Oleksandr**
Electric properties of carbon rocks of the Hnidyntsivske oil and gas condensate deposit of the Glynsko-Solokhiv gas condensate field ..... 18
**PETROKUSHYN Roman, BEZRODNYI Dmytro, BANCALA Giuseppe, DE LUCA Luciana**
Detection of geological object boundaries using the gravity tilt derivative method: a case study of the Carpathian foredeep ..... 26
**AKHMEDOV Tofik, KHALILOVA Lala**
Hydrocarbon prospectivity of the Zykh field associated with Pliocene-Miocene deposits in view of new 3D seismic survey data (Absheron oil and gas bearing region, Azerbaijan) ..... 33

## MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

**PAVLIUK Oleksandra, PAVLIUK Viacheslav, SEMENIV Oleh**
Rutile from the crystalline rocks of the southwestern part of the Ukrainian shield ..... 41

## HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

**BONCHKOVSKYI Oleksandr, OSTAPENKO Pavlo, ZHUKOVA Yaroslava, KRAVCHUK Illia, PETRYSHCHENKO Serhii, LAZARETS Adelina, HALAHAN Oleksandr, STEPANENKO Nazar**
War-induced soil contamination with heavy metals: results from a test site in Mykolaiv region ..... 51
**BEREZOVSKY Oleksiy, MIDYK Svitlana, KORNIENKO Valentyna, SAMKOVA Oksana, TONKHA Oksana, VISHOVAN Yurii, SEMENENKO Larysa, SMYRNYY Maksym**
Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon pollution in the sludge and soil of the Dnistrova canyon within the boundaries of the Horodenkiv territorial community ..... 58

## PETROLEUM GEOLOGY

**ALIYEVA Sudaba**
Geodynamic and paleotectonic analysis of the South Caspian megadepression in connection with oil and gas prospects (using the example of the Yevlakh-Agjabedi depression) ..... 65
**MAMMADOV Huseynaga, ABDULLA-ZADA Murad, POGORELOVA Elena**
Caspian pioneer: Structural complexity and hydrocarbon distribution in the Neft Dashlary offshore field ..... 75
**NASIBOVA Gultar, ZEYNALOVA Sevil**
Modeling of development optimization in Balakhani-Sabunchu-Ramana field (V horizon) ..... 88

## GEOINFORMATICS

**TRETIAK Anton, TRETIAK Valentyna, KAPINOS Nataliia, STRELNYK Viktoriia, PETROVA Nataliia**
Formation of the natural and ecological framework of land use at the regional level in the context of ensuring environmental stability: methodological and methodical approaches ..... 96
**VYZHVA Zoya, DEMIDOV Vsevolod, VYZHVA Andrii, SHOVKOPLIAS Tetiana**
The statistical simulation of dataset in 3D area with pentamodel type variogram to Rivne NPP geophysical monitoring ..... 104
**ZATSERKOVNYI Vitaliy, VOROKH Victor, HLOBA Olga, LIASHCHENKO Olesia, SIUIVA Iryna**
Application of machine learning methods and remote sensing data for crop yield forecasting ..... 114
**AGAKISHIYEVA Gunesh, JABRAYILOV Emil, MAMMADOVA Jahan**
Spatiotemporal analysis of thermal comfort in Azerbaijan ..... 122

## ECONOMIC GEOLOGY

**VYZHVA Serhii, BILIAVSKA Olha, BABCHUK Dmytro, BABCHUK Yuliia**
Critical raw materials in the context of the Ukraine facility program and European integration ..... 131

## REVIEW

**KRIL Tetiana, STRELTSOV Anton**
Engineering–geological conditions of the Dnipro slopes in the central area of Kyiv: a research retrospective and analysis of landslide hazard factors ..... 137

## ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 551.24+553.98(477.8)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.01

Володимир ШЛАПІНСЬКИЙ[1], канд. геол. наук.
ORCID ID: 0009-0009-0403-8421
e-mail: vlash.ukr@gmail.com

Мирослав ПАВЛЮК[1], д-р геол.-мінерал. наук, проф., акад. НАН України
ORCID ID: 0000-0001-8741-0624
e-mail: pavlyuk.myroslav@gmail.com

Ярослав ЛАЗАРУК[1], д-р геол. наук
ORCID ID: 0009-0002-2016-3424
e-mail: lazarukjaroslav@gmail.com

Олеся САВЧАК[1], канд. геол. наук.
ORCID ID: 0000-0003-1491-7613
e-mail: savchakolesya@gmail.com

Мирослав ТЕРНАВСЬКИЙ[1], провід. інж.
ORCID ID: 0000-0003-3520-847X
e-mail: matrix5@ukr.net

[1]Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

# НОВИЙ ПОГЛЯД НА ГЕОЛОГІЧНУ БУДОВУ ДІЛЯНКИ БОРИСЛАВ–МОДРИЧІ–ТРУСКАВЕЦЬ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ І ПЕРЕДКАРПАТТЯ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф., Володимиром МИХАЙЛОВИМ)*

**Вступ.** *Ділянка досліджень розташована в північно-західній частині Українських Карпат у трикутнику населених пунктів Борислав–Модричі–Трускавець Львівської області. До її складу входять чотири тектонічні одиниці (з південного заходу на північний схід): передова частина Скибового покриву Складчастих Карпат, так званий Проміжний ярус, Бориславсько-Покутський та Самбірський покриви. Вони складені як породами флішової формації вікового інтервалу верхня крейда–олігоцен, так і моласовим комплексом порід. Перші дві одиниці представлені породами лише флішової формації. У Бориславсько-Покутському покриві на флішовій основі з розмивом і стратиграфічною незгідністю залягають відклади моласової формації, представлені поляницькою, воротищенською, а місцями – і стебницькою світами. У Самбірському покриві відсутні породи флішу як ланки нормального послідовного розрізу. Моласовий комплекс містить грубоуламкові товщі: трускавецькі конгломерати та олістострому, які утворилася внаслідок розмиву давніших порід і відкладів флішу (загорські верстви). У статті розглянуто питання, які стосуються стратиграфії та тектоніки відкладів флішової та моласової формацій.*

**Методи.** *Використано такі методи: структурно-тектонічний, літологічний, геолого-геофізичний, геохімічний, гідрогеологічний.*

**Результати.** *Доведено присутність засолонених горизонтів у розрізі поляницької світи, що раніше приймалось за ознаки воротищенської світи і призводило до суттєвих помилок у структурних побудовах. Джерелом для екзотичних конгломератів у поляницько-воротищенських відкладах була кордильєра всередині моласового басейну осадконагромадження. У Береговій скибі відсутні поляницькі відклади неогену. Вперше в районі Борислава виділено Проміжний ярус – гранична структура між Скибовим та Бориславсько-Покутським покривами. Структурно він тяжіє до Бориславсько-Покутського покриву. Вперше в районі Борислава у складі Берегової та Орівської скиб виділено відповідно п'ять та вісім лусок. Обґрунтовано варіант пояснення явища, що виражено у відступанні лінії насуву Карпат в районі Борислава на південний захід. Сформульовано принцип, згідно з яким, якщо на якійсь ділянці Бориславсько-Покутського покриву встановлена ярусна послідовність похилих складок бориславського типу, то в північному напрямку вже не буде їх із флішем в основі.*

**Висновки.** *Складено великомасштабну геологічну карту ділянки Борислав–Модричі–Трускавець та чотири геологічні розрізи. Доведено велику амплітуду насуву Складчастих Карпат на Бориславсько-Покутський покрив. Запропоновано схему формування тектонічних дислокацій ділянки Борислав–Модричі–Трускавець.*

**Ключові слова:** *фліш, моласи, покриви, скиби, луски, загорські верстви, трускавецькі конгломерати, олістострома.*

## Вступ

***Постановка проблеми.*** З'ясування характерних особливостей зони зчленування Скибового, Бориславсько-Покутського та Самбірського покривів на ділянці *Борислав–Модричі–Трускавець*.

Проблема походження екзотичних конгломератів та олістостроми в неогені нижніх молас. Геодинамічні реконструкції на зазначеній ділянці.

***Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.*** На геологічній карті вказаної території 1976 р., виданій в УкрДГРІ, у складі Берегової скиби зображені відклади поляницької світи. Гіпотеза про наявність внутрішньобасейнової кордильєри в моласовому морі раніше не розглядалась. Була відсутня характеристика Проміжного ярусу. Відсутнє пояснення відступання лінії насуву Карпат у районі Борислава на південний захід.

***Формулювання цілей статті.*** Мета статті. Нова оцінка геологічної будови досліджуваної території.

## Методи

Структурно-тектонічний, літологічний, геолого-геофізичний, геохімічний, гідрогеологічний.

***Аналіз попередніх досліджень і публікацій.*** Завдяки давньому нафтовидобутку геологічне вивчення терену

© Шлапінський Володимир, Павлюк Мирослав, Лазарук Ярослав, Савчак Олеся, Тернавський Мирослав, 2025

Бориславa має тривалу історію. Література, присвячена геології Бориславa та його околиць, налічує надто багато позицій, тому зупинимось на найважливіших працях. З великої кількості літературних джерел відзначимо насамперед Атлас Геологічний Галіції, в якому Й. Гжибовський вперше згадав про насув Карпат на Передгір'я (Tołwiński, 1937b). У 1912 р. Б. Кропачек, перший керівник Бориславської геологічної станції, виходячи з матеріалів буріння нафтових свердловин, встановив похилий характер так званої Бориславської скиби. Він же є автором назви грубоуламкових трускавецьких конгломератів (Kropaczek, 1919). Розвиваючи уявлення про покривну будову Карпат, К. Толвінський у 1926 р. виокремив у їхній зовнішній частині – Скольській (Скибовій) одиниці – низку своєрідних тектонічних структур-скиб. Згідно з К. Толвінським, скиби – це групи великих лусок. Амплітуди насувів цих лусок у межах скиб значно менші, ніж переміщення між сусідніми скибами. Скиби утворились унаслідок розривів і насування великих антикліналей, які у процесі подальшого розвитку ускладнювались насувами меншої амплітуди всередині скиб (Tolwiński, 1937a). Насуви лусок у межах однієї скиби об'єднуються в єдину поверхню насуву скиби, утворюючи своєрідні елементи – яруси (до речі, в Бориславсько-Покутському покриві Передкарпатського прогину вони часто так і називаються). Велику увагу вивченню геології Бориславa і суміжних теренів приділили й українські вчені (Г. Алфер'єв, В. Буров, М. Вуль, О. Вялов, В. Глушко, Г. Доленко, М. Ладиженський, М. Федущак та ін.). Хто вперше виділив так званий Проміжний ярус як пограничну структуру між Скибовим та Бориславсько-Покутським покривами, достеменно невідомо, вірогідно, це були геологи-виробничники. Передкарпатський передовий прогин – це область, яка розташована між південно-західною частиною Західної та Східноєвропейської платформ і Складчастими Карпатами. Вона заповнена комплексом міоценових молас. За характером геологічної будови і геологічного розвитку в межах прогину виділяють Зовнішню (північно-східну) і Внутрішню (південно-західну) зони. Зовнішня зона сформована на платформній основі, Внутрішня належить до карпатського орогену, насуненого на Зовнішню зону. У 1969 р. запропоновано у складі Передкарпатського прогину виділяти три самостійні зони (з півночі на південь): Більче-Волицьку (відповідає Зовнішній зоні), Самбірську і Бориславсько-Покутську. Дві останні входили до складу Внутрішньої зони як підзони (Буров та ін., 1969). Самбірська зона – це безкореневий покрив, насунений на Більче-Волицьку зону. На чому відкладались нижні моласи в її складі – питання дискусійне. Одні дослідники вважають, що басейн, в якому формувались міоценові відклади Самбірської зони, обмежувався з північного сходу Сандомирсько-Добруджинською грядою, яка розмежовувала геосинклінальний басейн від платформи, а отже, зона повинна містити в своїй основі фліш (Вялов та ін., 1984). Інші припускали, що основою Самбірської зони були мезозойські і палеозойські відклади епіпалеозойської платформи (Тектоника Украинских…, 1986). Висловлювались думки і про можливість нагромадження молас Самбірської зони в проміжній ділянці між платформою і флішем (Круглов та ін., 1985). Пропагувалися також ідеї, які докорінним чином змінюють уявлення про поділ Передкарпатського прогину (Глушко, Лозыняк, & Петрашкевич, 1982; Лозиняк, 1996, 2001; Лозиняк, & Петрашкевич, 2007). Таким чином, ліквідовується Бориславсько-Покутська зона. Її південно-західна частина (Делятинський покрив) об'єднується зі Скибовим покривом у Сколівський шар'яж з огляду лише на літологічну подібність стратонів, що їх складають, і начебто незначну амплітуду насуву між ними. Згадані автори пропонують вилучити з його складу Зовнішню зону як просто крайову частину платформи. Північно-східна частина разом із Самбірським покривом мала б утворювати Стебницький покрив, в межах якого розвинені грубоуламкові та олістостромові утворення слобідсько-воротищенської товщі. Вважалося, що міоценові відклади північно-східної частини Зовнішньої зони і Самбірського покриву формувалися на флішовій основі. Стебницький покрив мав би знаходитися у фронтальній частині Карпатського шар'яжу. Автори таких ідей вважали, що "Алохтонне сучасне положення не дозволяє відносити Стебницький і Слобідський покриви ні до складчастої споруди, ні до платформи, а тим більше – виділяти у самостійний Передкарпатський прогин, який не має нічого спільного з тим палеопрогином, де формувались осадки цих покривів". Такі новації були справедливо розкритиковані низкою геологів (Круглов, 1999; Шлапінський, & Тернавський, 2020), які надали достатньо вагомі аргументи, щоб захистити положення про існування Передкарпатського прогину.

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** Конгломератам у відкладах неогену присвячена низка публікацій івано-франківських дослідників (Мончак, & Мончак, 2002; Маєвський, Жученко, & Мончак, 2004). Вони розглядали механізм утворення екзотичних конгломератів як результат абразії берегів (уступів) моласового моря. З другого берега, де піднімались Карпати над рівнем моря, надходив матеріал унаслідок руйнування чи перевідкладення матеріалу менілітових порід. Скидання з прибережної частини грубоуламкових осадків у віддалені частини відбувалося завдяки зміні рівня Світового океану, особливо при його пониженні, коли матеріал з прибережної частини розносився суспензійними потоками у глибоководні частини. На їхню думку, запропонований механізм формування конгломератів дає змогу обійтись без допущень про існування гіпотетичних кордильєр. У невеликій за обсягом статті Т.Ю. Марченко акцент зроблено на дослідженні самої гальки. Джерела надходження екзотичних конгломератів згадуються побіжно. Авторка відзначає: "Крім найпоширенішої гіпотези, за якою кордильєри – основне джерело живлення матеріалу, існують інші, за якими гальки домезозойських порід походили із Східноєвропейської платформи, Українського кристалічного щита, і навіть Балтійського щита" (Марченко, 2004).

На думку О.С. Ступки, "Граніто-гнейсові і корові покриви, які виповнювали ложе океану Тетіс або сформувалися на ньому, були зірвані зі своєї основи в процесі континентальної колізії. Рух цих алохтонних мас у північному напрямку зумовив формування шар'яжів, ріст нових внутрішніх підняттів з подальшою їх деформацією і виникнення нових джерел зносу. Шар'яжеутворення відбувалося, починаючи з першої половини крейди до міоцену з кульмінацією в пізній крейді і середині третинного часу. Із цієї сіалічної маси, яка насувалася на флішовий басейн, і виникали численні безкореневі кордильєри, а ті, у свою чергу, були тим основним джерелом осадів, які включалися в турбідітні системи, утворюючи Карпатський фліш. Тим самим не слід продовжувати тиражувати уявлення про кордильєри як про "виступи фундаменту", до того ж не відомо, якого за віком і складом" (Ступка, 2008).

Стаття М. М. Цар інформує про поширення екзотичних конгломератів в Українських Карпатах і фактично в Передкарпатському прогині, оскільки вони також локалізовані і в неогенових відкладах поляницької та

ISSN 1728-3817

воротищенської світ. Зокрема в ній згадані так звані трускавецькі конгломерати. Щодо джерел, з яких походили екзотичні конгломерати, вона зробила такий висновок: "Аналіз поширення екзотичних конгломератів показав, що вони зосереджені переважно у Внутрішній зоні Передкарпатського прогину та в складчастій області Карпат. Зіставивши основні виходи екзотичних конгломератів і вік товщ, у яких вони зосереджені, можна припустити, що уламковий матеріал поступав у флішовий басейн з півдня або з південного заходу" (Цар, 2018).

У статтях О.М. Гнилка і В.О. Ващенка розглянута версія, згідно з якою йдеться про локальний розмив флішу та навіть літологічне його заміщення моласами поляницької та воротищенської світ (Ващенко, & Гнилко. 2003; Гнилко, & Ващенко,2004). У невеликій розвідці геофізиків і нафтовиків висловлена ідея про локалізацію Верхньомасловецького нафтового родовища у Проміжному ярусі Карпат (Бодлак та ін., 2002).

***Загальна геологічна характеристика***

**Стратиграфічний нарис. Скибовий покрив, Проміжний ярус і Бориславсько-Покутський покрив.** Літолого-стратиграфічні параметри флішових відкладів цих структурних одиниць мають близькі характеристики і тому описані разом. Нижньо- та верхньокрейдові відклади присутні тільки в Скибовому покриві (рис. 1, 2).

**Нижня крейда.** *Спаська світа ($K_1sp$).* Темноколірні утворення спаської світи представлені чергуванням аргілітів чорних і темно-сірих, часто кременистих, некарбонатних з вицвітанням ярозиту; алевролітів і пісковиків дрібнозернистих темно-сірих кременистих некарбонатних. Трапляються пласти сидеритових мергелів, кременів, зрідка – гравелітів і конгломератів. За результатами вивчення решток молюсків і форамініфер вік світи датується баремом – альбом. Товщина світи коливається в межах 200–250 м.

**Верхня крейда.** *Головнинська світа ($K_2$ gl).* На породах спаської світи згідно залягають відклади головнинської світи. Вона представлена переважно світло-сірими плитчастими вапняками з прошарками аргілітів у різних співвідношеннях. У підошві і покрівлі світи присутні строкаті (зелені і червоні) аргіліти. На підставі мікрофауністичних даних вік світи визначається сеноман-туронським. Товщина світи змінюється від 70 до 250 м.

*Стрийська світа нерозчленована ($K_2$ str).* На породах головнинської світи згідно залягають породи стрийської світи. Вони повсюдно поширені у Скибовому покриві. У центральній його частині стрийську світу можна поділити на три підсвіти: нижню ($K_2str_1$), середню ($K_2str_2$) і верхню ($K_2$-$P_1str_3$). Аргументуємо це тим, що між подібними тонко-середньоритмічними нижньою та верхньою підсвітами залягає товща, у складі якої переважають пісковики або груборитмічний піщаний фліш. На розрізі I–I (рис. 2) стрийська світа зафіксована у складі трьох лусок Сколівської скиби. У двох тильних лусках вона залягає на відкладах головнинської світи, тому вона, вірогідно, представлена тільки відкладами нижньої підсвіти. У третій, фронтальній лусці, стрийська світа, ймовірно, знаходиться у складі підгорнутого і зірваного насувом північного крила антикліналі. Це також може свідчити про наявність тут давніших відкладів стрийської світи. Ця її частина представлена ритмічним чергуванням пісковиків і аргілітів, у яких містяться проверстки мергелів і вапняків. У розрізі переважають пачки тонкоритмічного перешарування цих порід, які розділяються головно піщаними пачками. Аргіліти сірі, темно- та зеленувато-сірі вапнисті і невапнисті, часто із фукоїдами. Трапляються пласти мергелів і вапняків різних відтінків сірого кольору, тонкоплитчастих. Пісковики сірі та сталево-сірі дрібнозернисті тонкоплитчасті карбонатні. Їхня товщина змінюється від 0,1–0,3 м до 0,8 м. Цемент, переважно карбонатний, становить до 50 % породи. Для всіх пластів характерна значна кількість кальцитових прожилків, на нижніх поверхнях пластів багато гієроглі-фів, а їхні покрівельні частини часто мають хвилясту і косу шаруватості. Товщина нижньої частини нерозчленованої стрийської світи сягає тут 600 м.

**Верхня крейда-палеоцен.** *Стрийська світа. Верхньострийська підсвіта ($K_2$-$P_1str$).* Найдавнішими породами в межах геологічної карти (рис. 1) є відклади верхньострийської підсвіти. У більшості розрізів вона складена тонкоритмічним чергуванням аргілітів сірих, темно-сірих, сіро-зелених вапнистих і невапнистих завтовшки 0,1–0,25 м, пісковиків і алевролітів дрібно- і середньозернистих сірих, сталево- і блакитносірих карбонатних, з прожилками кальциту, часто з конволютною шаруватістю, завтовшки зазвичай 0,1–0,25 м, подекуди до 0,4–0,7 м. Характерною особливістю цих пісковиків є значний вміст карбонатного цементу, через що вони дуже щільні і малопроникні. Неодмінним компонентом розрізу підсвіти є проверстки мергелів (0,1–0,25 м) і зрідка вапняків (до 0,3 м). Загалом у розрізі переважають аргіліти, складаючи до 60–65 % від об'єму порід. Загальна товщина верхньострийської підсвіти в межах ділянки досліджень коливається від 300 м до 1200 м.

**Верхній палеоцен.** *Ямненська світа ($P_1jm$).* На відкладах верхньострийської підсвіти верхньокрейдово–нижньопалеоценового віку стратиграфічно згідно залягає пачка середньоритмічного перешарування строкатих (зелених, сіро-зелених і вишневих) аргілітів, алевролітів і пісковиків (яремчанський горизонт). Товщина його досягає 15–20 м (Кульчицкий, & Хлопонин, 1957). Над яремчанським горизонтом, а якщо він відсутній, то безпосередньо над верхньострийськими відкладами, залягають товсто- і масивно-шаруваті ямненські пісковики. Це сіро- і зеленувато-сірі пісковики, різно- і дрібнозернисті, переважно не вапнисті, завтовшки 0,8–5,0 м, подекуди до 10–17 м. У вивітреному стані пісковики стають бурувато-жовтими. Їхньою характерною особливістю є різнозернистість і велика кількість включень молочно-білого кварцу та уламків метаморфічних порід переважно чорного і зеленого кольорів. Пласти пісковиків часто перешаровуються аргілітами сірими і зеленувато-сірими, зазвичай невапнистими, завтовшки 0,05–0,2 м. Подекуди трапляються пласти гравелітів і дрібногалечникових конгломератів. У складі гальки конгломератів спостерігаються кварц, зелені і червоні філіти припустимо кембрійського або навіть докембрійського віку. Присутні також штрамберзькі вапняки юри, чорні кремені нижньої крейди, девонські кварцові пісковики, сірі силурійські пісковики з остракодами і навіть тріасові пісковики верукано. Товщина пісковиків ямненської світи в Береговій скибі в районі Борислава змінюється від 60 м до 90 м.

**Еоцен.** *Витвицька і попельська світи ($P_2$).* На геологічній карті району еоценові відклади зображені нерозчленованими (рис. 1.). Відклади еоцену згідно залягають на породах ямненської світи. Витвицькі верстви зосереджені в низах розрізу, а попельські – у його верхах. Границя між ними діахронна.

**Нижній-середній еоцен**. *Витвицька світа ($P_2vt$).* Витвицькі верстви (Вялов, 1951) представлені переважно тонкоритмічним чергуванням аргілітів зеленувато- і темно-сірих невапнистих і вапнистих середньошаруватих з пісковиками сірими і темносірими середньозернистими, часто карбонатними, завтовшки до 0,8 м, які спорадично

утворюють пачки (товщина від 3–5 м до 25 м) і алевролітами сірими дрібнозернистими некарбонатними міцними завтовшки зазвичай 0,2–0,5 м. Це чергування аргілітів зелених і червоних із пластами сірих і світло-сірих піщовиків завтовшки до 1,2 м.

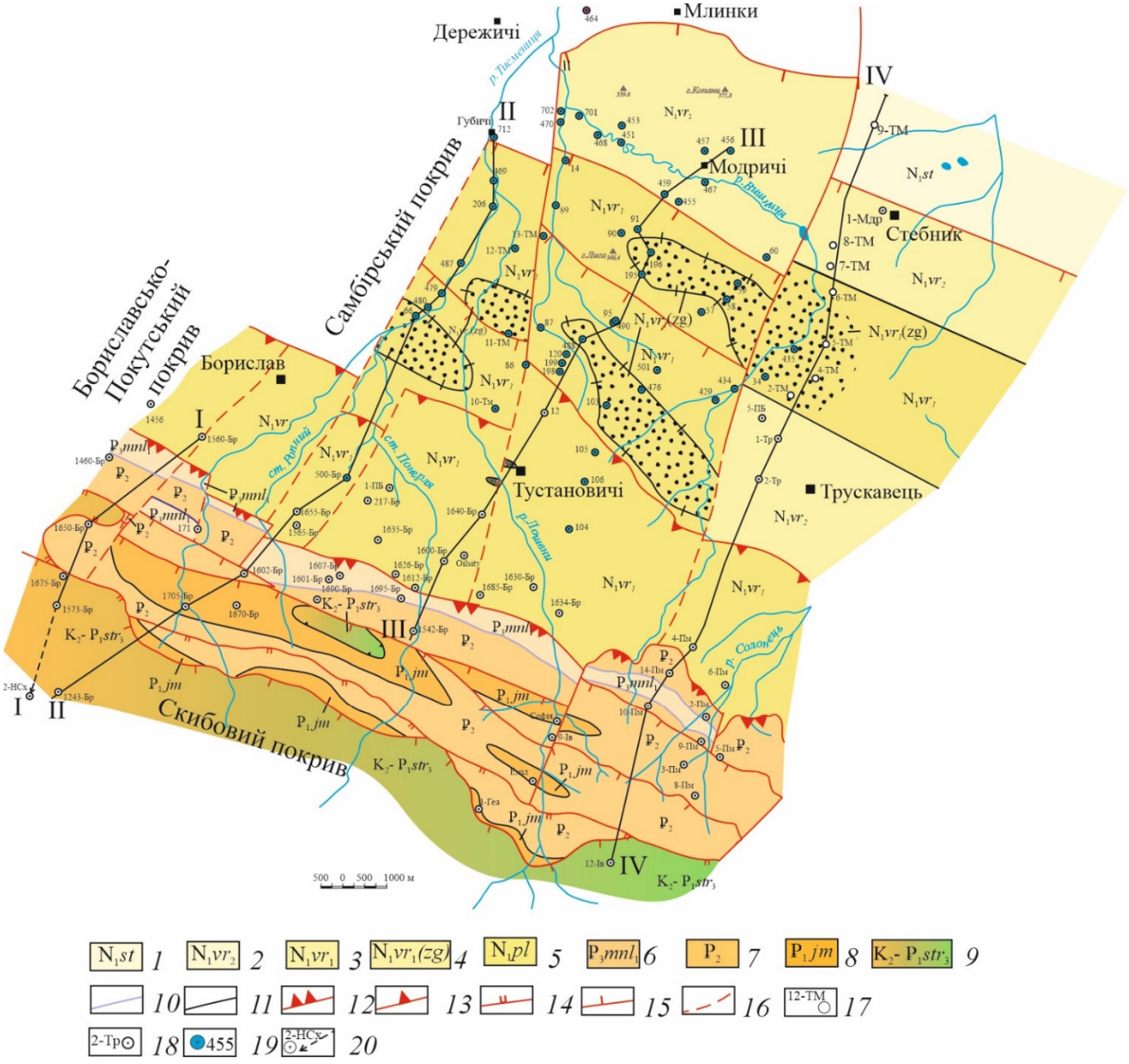



**Рис. 1. Геологічна карта дільниці Борислав–Модричі–Трускавець (склали В. Шлапінський, Є. Кондратюк, М. Тернавський):**

неоген: 1 – стебницька світа; 2 – верхньоворотищенська підсвіта; 3 – нижньоворотищенська підсвіта; 4 – нижньоворотищенська підсвіта (загорські верстви); 5 – поляницька світа; 6 – олігоцен, нижньоменілітова підсвіта; 7 – еоцен нерозчленований; 8 – палеоцен, ямненська світа; 9 – верхня крейда-палеоцен, верхньострийська підсвіта; 10 – олігоцен, нижньокременевий горизонт; 11 – згідні геологічні границі. Насуви: 12 – Скибового покриву; 13 – Бориславсько-Покутського покриву; 14 – скиб; 15 – лусок; 16 – скидо-зсуви. Свердловини: 17 – глибокі на площах Бр– Борислав, Ів–Іваники, Мр–Мражниця, ПБ–Північний Борислав, Ойл Сіті, Пм–Помірки, Тр–Трускавець, Мдр–Модричі); 18 – структурно-пошукові (ТМ–Трускавець-Модричі); 19 – гідрогеологічного призначення; 20 – уявна лінія розрізу І–І, яка продовжується за межі геологічної карти

За даними мікрофауністичного аналізу вік витвицьких верств датується нижнім – середнім еоценом. Контакт із попельськими верствами, які перекривають витвицькі відклади, нечіткий. Товщина витвицької світи коливається від 110 м до 220 м.

**Верхній еоцен.** *Попельська світа (P₂pp).*

ISSN 1728-3817

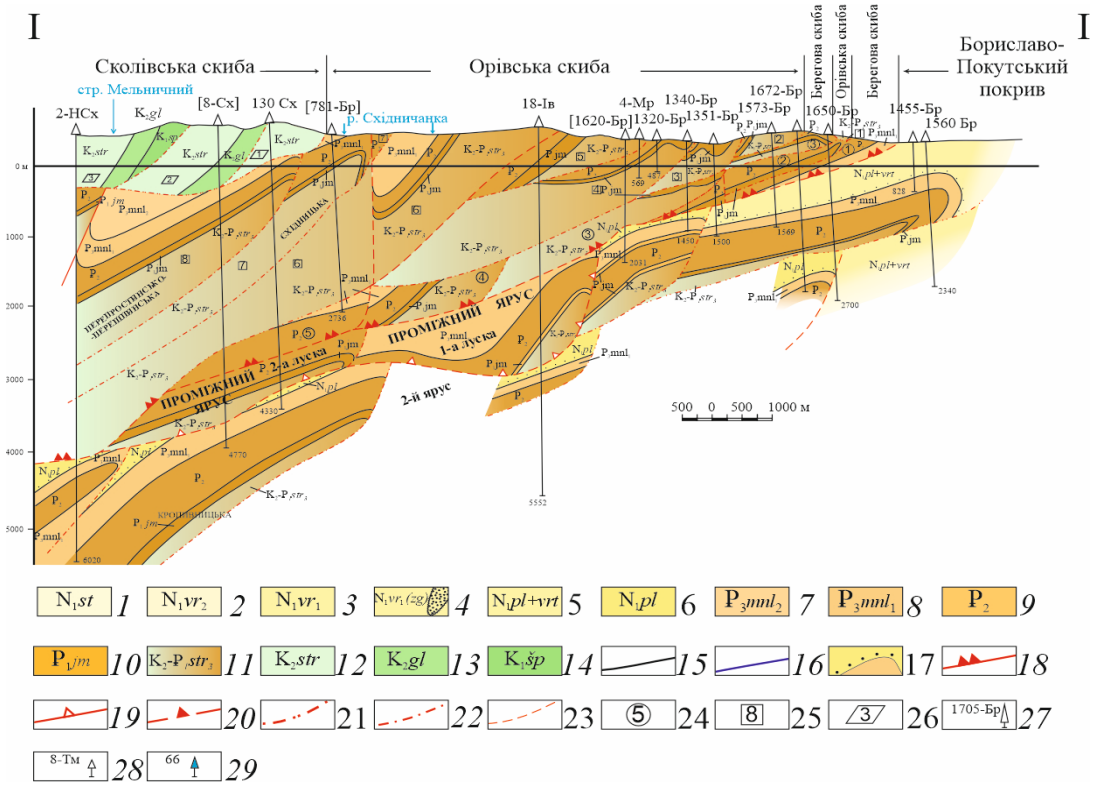



**Рис. 2. Геологічний розріз по лінії свердловин 2–Новосхідницька–1560–Борислав (склав В. Шлапінський):**
неоген: 1 – стебницька світа, воротищенська світа: 2 – верхня підсвіта; 3 – нижня підсвіта;
4 – нижня підсвіта (загорські верстви); 5 – поляницька+воротищенська світи; 6 – поляницька світа. Олігоцен: менілітова світа:
7 – середня підсвіта, 8 – нижня підсвіта, 9 – еоцен нерозчленований, 10 – палеоцен ямненська світа, 11 – верхня крейда-палеоцен, верхньострийська підсвіта, 12 – верхня крейда, стрийська світа нерозчленована, 13 – верхня крейда, головнинська світа,
14 – нижня крейда, спаська світа. Геологічні границі: 15 – нижньокременевого горизонту, 16 – згідні, 17 – незгідні (розмив).
Насуви: 18 – Берегового покриву, 19 – Проміжного ярусу, 20 – Бориславсько-Покутського покриву, 21 – скиб, 22 – лусок,
23 – розривні порушення (скидо-зсуви). Номери скиб: 24 – Берегової, 25 – Орівської, 26 – Сколівської.
Свердловини: 27 – глибокі (НСх–НоваСхідниця, Сх–Східниця, Бр–Борислав, Ів–Іваники, Мр–Мражниця, ПБ–Північний Борислав, Пм–Помірки, Тр–Трускавець, Мдр–Модричі; 28 – структурно-пошукові (ТМ–Трускавець–Модричі; 29 – гідрогеологічні

Попельські верстви загалом займають верхню частину розрізу еоцену (Kropaczek, 1919). Їх можна вважати фаціальним аналогом бистрицької світи. Проте переходи між цими різновидами дуже складні: вони часто взаємно заміщуються як по латералі, так і в розрізі. Тому чітко відокремити ділянки розвитку попельських верств від утворень бистрицької світи неможливо. Назагал це теригенно-карбонатна товща з уламками екзотичних порід і слідами підводних зсувів, яка локально розвинута в зовнішній частині Скибового положення. У нижній частині витвицьких верств часто присутня строкатоколірна пачка. Попельська світа представлена чергуванням алевролітів сірих глинистих, сильно карбонатних, блакитно-сірих у результаті вивітрювання, нерівноверствуватих (товщина 0,05–0,2 м) з аргілітами сірими і темно-сірими при вивітрюванні білуватими, сильно карбонатними, нерівношаруватими із включенням гальок і валунів сірих, пісковиків дрібнозернистих, мергелів, кременів і вапняків типу штрамберзьких, а також рифейських філітів і конгломератів. Місцями карбонатні попельські верстви заміщуються флішом бистрицького типу. За віком утворення попельської світи належать до середнього-верхнього еоцену. Товщина світи досягає 60–120 м.

**Менілітова світа (P₃*mnl*).** Світа за літологічними особливостями ділиться на три підсвіти: нижню, середню і верхню. У межах карти присутня тільки нижня підсвіта. *Нижньоменілітова підсвіта (P₃mnl₁)*. У низах підсвіти виділяються послідовно підкременева пачка і нижньокременевий маркуючий горизонт. Підкременева пачка трапляється або у вигляді ритмічного чергування порід менілітової фації (аргіліти чорні і коричневі некарбонатні мікроверствуваті (листкуваті) кременисті і бітумінозні та алевроліти і пісковики сірі і темно-сірі некарбонатні і мергелі сірі чи коричневі). Товщина пачки досягає до 15 м. Нижньокременевий горизонт складений кременями чорними і коричневими із супутніми породами: аргілітами чорними, вапняками, мергелями, пісковиками і алевролітами, осадовими кварцитами, туфітами. Товщина горизонту змінюється від 12 м до 22 м. Вище розріз підсвіти складений породами менілітової фації. Часто вище кременів присутня пачка тонкоритмічного чергування аргілітів чорних і коричневих некарбонатних тонкоплитчастих і листкуватих, при вивітрюванні з яскраво-жовтими вицвітанням ярозиту та дрібними кристалами гіпсу на площинах нашарування (0,045–0,5 м) та пісковиків сірих, темно-сірих кварцових різнозернистих (догори переходять у крупнозернисті) некарбонатних тонко- і середньошаруватих, подекуди смугастих (0,1–0,4 м), з пластами мергелів сидеритистих. Товщина пачки становить 40–120 м. Неповсюдно, на різних стратиграфічних рівнях, але часто у низах підсвіти простежуються так звані клівські пісковики. Це світло-сірі, дрібно-середньозернисті породи, некарбонатні, масивної текстури, які у підошві місцями переходять у гравеліти завтовшки від 0,2–1,2 м до 5 м. Клівські пісковики розділені проверстками аргілітів чорних і алевролітів. Товщина пачки змінюється від перших метрів до 60 м. Над клівськими пісковиками розріз підсвіти представлений пачками тонко- і

середньоритмічного чергування описаних вище порід. Товщина нижньоменілітової підсвіти в межах ділянки досліджень становить 130–250 м. У Бориславсько-Покутському покриві на розмитій поверхні нижньоменілітової підсвіти трансгресивно залягають відклади нижнього міоцену.

***Бориславсько-Покутський покрив***

**Міоцен нижній.** *Поляницька світа ($N_1pl$).* Поширена в межах Бориславсько-Покутського покриву. З регіональним, а не локальним розмивом залягає в межах покриву на стратиграфічно різних рівнях менілітової світи олігоцену, а місцями – і еоцену (Шлапінський, Павлюк, & Тернавський, 2020). У статтях В.О. Ващенка та О.М. Гнилка робиться висновок про локальний розмив флішових відкладів і навіть про літологічне заміщення моласами менілітової світи олігоцену та утворень еоцену (Ващенко, & Гнилко, 2003; Гнилко, & Ващенко, 2004). Цей помилковий висновок спростовується тим, що між інверсією флішового басейну і етапом моласової трансгресії існувала часова перерва, яка тривала близько 800 тис. років (Шлапінський, 2012). Це підтверджується навіть при погляді на відповідні геологічні розрізи, де відсутні верхи нижніх, середньо- та верхньоменілітових відкладів (рис. 2–5). Крім того, каротажні діаграми свердловин, які розкривали відклади менілітової і поляницької світ, дають змогу їх чітко відрізнити підвищеними і диференційованими опорами перших. У районі Борислава поляницька світа представлена чергуванням сірих карбонатних пісковиків, алевролітів і аргілітів, глин аргілітоподібних, подекуди загіпсованих. У підошовній частині виділяються конгломерати, складені галькою зеленувато-сірих сланців і доломітів з уламками розміром від кількох міліметрів до 3 см. Зрідка трапляються уламки чорних менілітоподібних аргілітів і сірих мергелів розміром до 5 см. У свердловинах 1655, 1680-Борислав товщина підошовних конгломератів досягає 40–70 м (Сафаров та ін., 1962). Така велика товщина свідчить про значні масштаби розмиву доальпійських утворень і відкладів карпатського флішу. Верхня границя зазвичай визначається за появою засолонених порід.

Пісковики та алевроліти світи світло-, темно- та зеленувато-сірі, переважно слабо зцементовані, залягають прошарками завтовшки від 10 до 30 см. Структура пісковиків дрібно- і середньозерниста, зрідка грубозерниста. Кластичний матеріал, що сягає 75–95 % породи, представлений зернами кварцу, уламками порід менілітової світи та рифею, місцями з рослинним детритом. Цемент карбонатно-глинистий і карбонатний порового типу. Глини та аргіліти сірі та зеленувато-сірі з блакитним відтінком. Вони грубошаруваті і масивні, слюдисті, карбонатні, часто піщанисті (від 7–8 до 30 % розрізу), нерідко зі шкарлупуватим зламом. У розрізі світи трапляються окремі прошарки аргілітів менілітового типу. Прошарки загіпсованих глин характерні переважно для глинистої верхньої частини світи. Нижня границя поляницької світи на каротажних діаграмах достатньо виразна на відміну від верхньої її межі.

Зазвичай границя між поляницькою і воротищенською світами проводиться за появою в розрізі кам'яної солі воротищенського віку. Однак відомо багато прикладів, коли засолонені породи трапляються на різних стратиграфічних рівнях і в поляницькій світі. Наприклад, у районі нафтового родовища Долина кристалічна сіль подекуди трапляється в розрізі поляницької світи на віддалі 200–300 м від її підошви. В районі Улично в багатьох свердловинах приблизно в середній частині поляницької світи зафіксовано пачку засолонених глин завтовшки 100 м, яку приймали за воротищенську світу (Глушко, Лозыняк, & Петрашкевич, 1982). У багатьох свердловинах Вільхівської площі (Майданське піввікно) у товщі порід поляницької світи є високоомна пачка, яку дослідники приймають за нижню границю воротищенської світи. В параметричній свердловині 1-Страшевичі засолонені породи розкриті в самій підошві поляницької світи, над розмитою покрівлею менілітових відкладів. У Бориславському нафтогазовидобувному районі у свердловинах 8, 10, 11, 25, 28 площі Іваники та 3 і 38-Орів у середній частині поляницької світи залягає пачка засолонених глин завтовшки 40–110 м. Такі пачки, складені засоленнними глинами та грубоуламковими породами, є лінзоподібними тілами у товщі поляницьких порід. Їх помилково приймали за породи воротищенської світи і відокремлювали насувами від практично одновікових незасолонених порід, які залягають гіпсометрично вище. Такі помилкові інтерпретації зафіксовані, наприклад, на площах Улично і Семигинів. У сусідніх свердловинах 12, 18 і 13 площі Орів, які розкрили одну і ту ж складку по простяганню, визначено таку стратиграфічну послідовність порід у нижньоміоценовому комплексі. У свердловині 12 в інтервалі глибин 1280–1744 м – $N_1pl$, 1744–2570 м – $N_1vr$, 2570–2776 м – $N_1pl$, у свердловині 18 в інтервалі глибин 1260–2503 м – $N_1pl$, у свердловині 13 в інтервалі глибин 1312–2032 м – $N_1pl$, 2032–2083 м – $N_1vr$, 2083–2734 м – $N_1pl$. Очевидно, що у свердловині 12 воротищенська вкладка у поляницькій товщі становить аж близько 800 м, тоді як у свердловині 18 вона відсутня, а у свердловині 13 сягає лише 60 м. Наведений приклад свідчить про такі значні масштаби літологічних заміщень обох товщ, що в деяких випадках можна говорити про нерозчленований поляницько-воротищенський комплекс.

На різних ділянках покриву у складі поляницької світи зафіксовано олістостромові горизонти з перевідкладеними породами флішу і відкладів платформи (Ващенко та ін., 2009). У районі Борислава вони на денній поверхні не зафіксовані, у розрізах свердловин олістостромові горизонти також. На геологічних картах району Борислава перед фронтальним насувом Берегової скиби зображена вузька смуга "поляницької" світи, яку відносять до складу скиби. Однак жодного стосунку згадана смуга до самої скиби не має, оскільки контакт між ними тектонічний. Ця товща, літологічно подібна до поляницької, є частиною нерозчленованого поляницько-воротищенського комплексу, причому не найнижчою її складовою. На це вказує те, що між відкладами флішу Берегової скиби і цією поляницькою товщею присутня смуга порід воротищенської світи. Ця ситуація зображена на відомій геологічній карті району Борислава, складеній Ладиженським (1955). Вік поляницької світи на підставі знахідок в її глинах комплексу мікрофауни *Globigerina pseudoedita* Subb., *G. juvenilis* Bolli, *Turborotalia brevispira* (Subb.) належить до нижньої частини егенбурзького регіоярусу. Нередукована товщина поляницької світи змінюється в широких межах і становить, для прикладу, на площі Іваники в першому ярусі складок 600–1100 м, у другому – 160–300 м.

***Бориславсько-Покутський та Самбірський покриви***

*Воротищенська світа ($N_1vr$).* Розкрита численними свердловинами. Представлена сірими глинами різного ступеня карбонатності з лінзоподібними прошарками пісковиків та алевролітів. Відклади світи загалом засолонені. Вони вміщують лінзи кам'яної та калійних солей завтовшки 5–60 м. Над соленосною товщею у зоні її вилуговування утворюється гіпсо-глиниста "шляпа" – сіра глиниста маса, насичена кристалами прозорого гіпсу та брилами жовтого і рожевого гіпсу. Товщина гіпсо-

глинистої "шляпи" становить 50–100 м, подекуди сягаючи 200 м. Поділ воротищенської світи на підсвіти утруднений через відсутність надійних витриманих реперів і суттєву літолого-фаціальну мінливість по вертикалі та латералі. Більшість геологів розподіляли воротищенську світу на три підсвіти: нижньоворотищенську, середньоворотищенську (загорську) та верхньоворотищенську (Ладыженский, & Антипов, 1961; Глушко, & Круглов, 1971). Такий поділ неможливий навіть на порівняно невеликій ділянці через тенденцію загорської грубоуламкової світи до швидкого виклинювання. З усвідомленням цього деякі геологи прийняли двочленний поділ воротищенської світи, тобто з виділенням нижньої та верхньої підсвіт. Загорська підсвіта віднесена до нижньоворотищенської підсвіти (Глушко, Лозыняк, & Петрашкевич, 1982). Автори статті також прийняли такий самий поділ воротищенської світи.

Особливістю нижньоворотищенської підсвіти в Бориславсько-Покутському покриві та в південній частині Самбірського покриву на ділянці досліджень часто є підвищена піщанистість (Ладыженский, 1955). У південно-західній лусці Самбірського покриву свердловиною № 2-Трускавець під загорськими верствами розкрита піщана пачка завтовшки 100 м, просякнута сіллю (Ладыженский, & Антипов, 1961). У середній частині розрізу світи виявлено екзотичні конгломерати. Подекуди серед них присутні потужні піщані пачки, у яких товстошаруваті різнозернисті пісковики відокремлені верствами масивних глин. Ці пісковики складаються з уламків екзотичного (позакарпатського) матеріалу. Крупнозернисті до гравелітистих товстошаруваті пісковики фігурують у багатьох старих звітах під назвою "жупних".

Широко розвинуті також олістостромові горизонти і окремі олістоліти, подекуди значних розмірів. Вони зафіксовані у вигляді пачок і окремих тіл, брил, гальки і уламків порід давніших молас (поляницької світи), флішу і більш давніх відкладів платформи (Глушко, Лозыняк, & Петрашкевич, 1982).

Конгломерати як складники олістостромового комплексу, виділені в районі Трускавця, носять назву трускавецьких. Екзотичні гальки, якими складені конгломерати, представлені на бориславсько-трускавецькій ділянці переважно зеленими метаморфічними сланцями і зеленими щільними пісковиками. В меншій кількості присутні червоні глинисті сланці, зелені, червоні та строкаті філіти, кварцові конгломерати із зеленим піщанистим цементом і жовтуваті доломітизовані вапняки. Цементуюча речовина екзотичних конгломератів різноманітна за кольором, мінералогічним складом, ступенем карбонатності, вмістом цементу і щільністю цементації. Вміст цементу в уламковому матеріалі зазвичай становить від 10 до 20 % (Федущак, 1962).

Переважають гальки середніх розмірів, близько 5–10 см. Місцями зустрічаються брили величиною 30–40 см. Усі вони, за винятком вапняків, погано обкатані, кутасті (Алферьев, 1949). Екзотичні конгломерати трапляються як самостійно, так і в асоціації з чорними аргілітами менілітового типу. В одних відслоненнях переважають перші, в інших – другі. Здебільшого виходи олістостромових товщ на поверхню простежені на кілька сотень метрів, а подекуди – і кілометрів. На деяких ділянках ряди паралельних виходів конгломератів перериваються проміжками порід воротищенської світи без конгломератів. Найбільша така ділянка розташована в районі Трускавця. Тут найпівденніша смуга простягається безперервно від урочища Помірки через урочище На Лугу до джерела Зося. В західному напрямку ця смуга різко відхиляється на північ, наближаючись до ріки Вишниці. Дещо на північ, на відстані 2–3 км, великий ізольований масив конгломератів охоплює Бабину гору і гору Глорієта. На схід від неї розташовані виходи конгломератів у лісі Баньки поблизу залізниці Трускавець–Стебник. На захід від ріки Вишниці розташована друга ділянка широкого розвитку конгломератів. У його південній частині вона простягається майже без перерви, починаючись на р. Вишниці і закінчуючись у Бориславі в районі вул. Коцюбинського біля Малого базару на Волянці. Вірогідно, що ця смуга є продовженням південної смуги виходів конгломератів у районі Трускавця, відірвана від неї скидом по р. Вишниця. У північному напрямку зафіксовано відслонення чорних аргілітів і конгломератів в рівчаку, який простягається на південь від трускавецького шосе і невеликий вихід конгломератів біля церкви св. Миколая. Ще далі на північ (на Вишниці) простягається велика ділянка конгломератів, яка розглядалася К. Толвінським як зміщена частина масиву Бабина гора – гора Глорієта (Алферьев, 1949).

Олістостромові утворення, зокрема чорні аргіліти, описані як у природних відслоненнях, так і в розрізах свердловин. Свердловиною Аделя, розміщеною у Бориславі на р. Тисмениця на схід від виходу на земну поверхню чорних аргілітів воротищенських верств, вони розкриті на глибині 4 м. Нижче знайдено товщу соленосних глин, в якій знову були присутні чорні аргіліти завтовшки 11 м. Аргіліти закартовані у вигляд ізольованого масиву завдовжки 130–150 м (Алферьев, 1949). Менілітоподібні відклади на Бабиній горі, встановлені пробуреними тут трестом Укрнафторозвідка свердловинами 2, 3, 4-Б, залягають серед відкладів загорської світи у вигляді 200-метрової плити завдовжки 800 м і завширшки 300 м (Никулина, & Колтун, 1953). Раніше вважалося, що такі горизонти поширені виключно в середній частині воротищенського розрізу (загорська світа). Однак ця думка є помилковою, бо подібні утворення трапляються в різних частинах цього комплексу, а іноді вони взагалі відсутні. Проте повністю ігнорувати можливість розчленування воротищенської світи за допомогою горизонтів конгломератів у місцях їхнього максимального розвитку не варто.

Раніше вважалося, що джерелом грубоуламкового матеріалу є Свентокшиcько–Добруджинська гряда – мегантиклінорій, в ядрі якого виходять породи рифею, а на крилах залягають відклади палеозою. Пізніше встановлено, що це палеозойська структура так званого Тарнувського прогину, виділеного у 1965 р. В.В. Глушком, в основі якої – відклади рифею. Уламки та брили порід силуру, девону, карбону в крейдово-палеогеновому фліші Карпат і міоценових молассах Передкарпатського прогину свідчить про те, що Тарнувський палеозойський прогин простягається в південно-східному напрямку разом із мезозойськими відкладами, що перекривають його, вздовж усіх Українських Карпат аж до м. Верховини, а можливо, й далі (Глушко, & Круглов, 1977).

Більш обґрунтовано виокремлюється верхня частина воротищенського комплексу. Вона представлена в основному глинами сірими, часто темно-сірими, сильно загіпсованими і засоленими. Карбонатність глин змінюється в межах 20–40 %, і за цим показником вони не відрізняються від глин поляницької світи. Серед мінеральних новоутворень у воротищенських глинах присутні кальцит, гіпс, ангідрит, полігаліт, мінерали калійних солей, целестин, барит, пірит, галеніт, сфалерит. Глини вміщують проверстки світло-сірих пісків, пісковиків та алевролітів. Проверстки завтовшки 0,03–0,05 м доволі міцні, з тонкою хвилястою шаруватістю та слідами

спливання осадів на підошвах шарів. Пласти пісковиків, які мають більшу товщину – до 0,5 м і більше, зцементовані значно слабше. Турбідітних текстур у шаруватих відкладах не встановлено, натомість помічені сліди різномасштабних мілководних брижів течій. Вірогідно, внаслідок тектонічних напруг прошарки пісковиків були поламані на кутасті уламки і утворили брекчієподібну породу, так звану піщано-глинисту брекчію, часто на галітовому цементі. Така вторинна брекчійованість соленосних глин часто спостерігається в природних відслоненнях, шахтах та свердловинах (Ващенко, 2009). У стратиграфічній схемі воротищенська світа охоплює верхню частину егенбургського регіоярусу. Збережена (неповна) товщина воротищенської світи становить 700–1200 м.

**Стебницька світа (N$_1$*st*)** стратиграфічно згідно залягає на верхньоворотищенській світі і поступово нарощується балицькою світою. У Самбірському покриві в районі Трускавця–Стебника вона переважно глиниста і складена тонкоритмічним, іноді середньоритмічним перешаруванням рожевих, зеленувато-сірих, сірих, місцями чорних глин з алевролітами та пісковиками. Товщина світи 400–1000 м.

**Балицька світа (N$_1$*bl*)** відома тільки в межах Самбірського покриву, де вона поступово нарощує стебницьку світу. Як літостратиграфічна одиниця вона була виділена (Cizancourt, 1925) поблизу с. Баличі (тепер с. Заріччя) на р. Свіча. Загалом світа представлена зеленувато-сірими, тонкошаруватими, переважно карбонатними глинами з прошарками алевролітів та пісковиків. Товщина світи 350–750 м.

Значне поширення мають не тільки галька і брили, а й розмиті та перевідкладені породи олігоцену і еоцену. Вони добре виділяються в керні свердловин завдяки зеленому і чорному забарвленню порід, нехарактерному для моласового комплексу. Крім цього, перевідкладені породи олігоцену менілітового типу мають підвищену гамма-активність (до 20–35 мкр/год), яка значно перевищує показники сіроколірних аргілітів і глин поляницько-воротищенської товщі. Просторова близькість екзотичних конгломератів та олістолітів, складених породами флішової формації, виглядає невипадковою і свідчить про близьке розташування джерел їхнього зносу. Джерело зносу для екзотичних конгломератів розміщувалося на північний схід від їхнього теперішнього положення, про що свідчить збільшення розміру уламків порід, які їх складають. На це вказує таке: свердловиною 18–Іваники встановлений надзвичайно великий півторакілометровий інтервал розрізу, майже повністю виповнений бриловими екзотичними конгломератами. У привибійному інтервалі 4120–5552 м свердловина розкрила воротищенські відклади другого ярусу Бориславсько-Покутського покриву, а у воротищенському басейні відклади цього ярусу, які нині знаходяться під насувом згаданого покриву, розташовувалися північніше від нього. Але це зауваження стосується відкладів, які тепер складають Бориславсько-Покутський покрив, а описані дрібніші конгломерати Бабиної Гори і гори Глорієти, що зосереджені в межах Самбірського покриву, знаходилися ще далі на північ. Ця невідповідність між величиною гальки конгломератів обох покривів, імовірно, вказує на те, що джерела постачання екзотики розділяли воротищенський басейн осадконагромадження принаймні на дві частини. Можемо припустити, що існував архіпелаг островів, складений відкладами дофлішової основи. Тому на них не було флішового чохла, зокрема темнокольорових порід менілітової світи олігоцену. Щодо різноколірних філітів рифею, які є у складі трускавецьких конгломератів, то варто навести висновок М. Федущака: "Для того, щоб обкататися до цього ступеня, таким відносно нестійким породам необхідно було пройти короткий шлях переносу, а можливо, досить було переміститись у басейн. Тому можна вважати, що ці уламки в корінному заляганні розташовувались на невеликій віддалі від басейну та були принесені тимчасовими потоками" (Федущак, 1962). Джерелами для олістостроми з матеріалом флішової компоненти були береги моласового басейну, розташовані в південно-західному напрямку від нього.

***Структурно-тектонічне положення основних елементів***

Перед тим як розглянути особливості будови окремих тектонічних одиниць, варто нагадати, за якими критеріями вони виокремлені. Це більше стосується одиниць, у складі яких присутні відклади моласової формації. Скибовий покрив – це частина мегапокриву Складчастих Карпат. Проміжний ярус є передовою частиною флішового масиву, втягнутою у прогинання. Тут відклалися моласи, які пізніше були денудовані. Бориславсько-Покутський покрив – це тектонічна одиниця, утворена відкладами нижніх молас, підошва яких залягає на фліші з розмивом. Самбірський покрив складений нижніми моласами без флішової основи та поляницької світи (рис. 1).

Нагадаємо, що за амплітудами переміщень у Складчастих Карпатах і Передкарпатському прогині виділяють покривні одиниці кількох рангів: I, II, III та IV (відповідно: покриви, субпокриви, скиби та луски).

**Скибовий покрив Складчастих Карпат** – це безкоренева тектонічна одиниця I-го рангу, переміщена в північно-східному напрямку. У межах площі він є найбільш зовнішньою частиною Українських Складчастих Карпат. По насуву Скибовий покрив перекриває значну площу Бориславсько-Покутського покриву. Амплітуда насуву становить щонайменше 20 км. Характерною особливістю Скибового покриву є розвиток своєрідних структур – скиб, які у свою чергу складаються з низки лусок. Скиби відзначаються значними горизонтальними переміщеннями відносно сусідніх одиниць такого ж порядку. Розташовані в межах скиби луски мають невеликі амплітуди насування. Тому в межах однієї скиби зазвичай спостерігаються порівняно невеликі зміни літології стратиграфічних одиниць, що їх складають.

**Берегова скиба.** Є передовою скибою Скибового покриву. Місцями вона насунена на Проміжний ярус, а на більшій частині площі – безпосередньо на Бориславсько-Покутський покрив. З південного заходу Берегову скибу обмежує насув Орівської скиби. На денній поверхні до складу Берегової скиби входять зазвичай дві-три луски (рис. 1). Під насувом Орівської скиби присутні ще дві луски (рис. 2). Фронтальна луска Берегової скиби простягається вздовж всієї її довжини у фронтальній частині. В районі Борислава луска представлена відкладами олігоцену та еоцену в різних структурних співвідношеннях. Друга і третя луски – це фрагменти антикліналей, зрізаних похилими насувами і складених в ядерних частинах відкладами ямненської світи та верхньострийської підсвіти верхньої крейди – палеоцену.

**Орівська скиба.** Це друга скиба Скибового покриву, яка простежується через усі Українські Карпати. У перетині Борислав–Східниця Орівська скиба налічує аж вісім лусок (рис. 2). У межах ділянки Борислав–Модричі–Трускавець на геологічній карті видно фрагменти трьох її лусок. Фронтальна луска, складена відкладами верхньострийської підсвіти, виходить на поверхню на північний захід від г. Городище (641,8 м), яка височить над

ISSN 1728-3817

містом Бориславом. Друга луска є фрагментом північно-східного підвернутого крила антикліналі, зірваного насувом. Вона вирізняється оберненою стратиграфічною послідовністю верств. Третя луска представлена фрагментом південно-західного крила цієї ж складки, у чоловій фронтальній частині якої поширені відклади стрийської світи (рис. 1).

**Сколівська скиба.** Це третя скиба Скибового покриву (рис. 2). У межах розрізу I–I складається з трьох лусок, найпівденніша з яких представлена повним набором відкладів крейди зі спаською, головнинською та стрийською світами. На денній поверхні фіксуються круті падіння пластів на південний захід і такі ж стрімкі насуви лусок, але вже на глибині 1,5 км насуви всіх трьох лусок об'єднуються в єдиний субгоризонтальний насув.

**Проміжний ярус.** Ця структурна одиниця займає проміжне положення між відкладами передової частини Складчастих Карпат і Бориславсько-Покутським покривом. Він представлений лусками, які складені крейдово-палеогеновим флішем. Поляницько-воротищенські відклади в ньому відсутні (рис. 2). Проміжний ярус насунений на відклади Бориславсько-Покутського покриву. У свою чергу він повністю перекритий покривами Складчастих Карпат і на поверхню не виходить. Це свідчить про те, що він зазнав прогинання і пізніше опинився під насувом передової частини Складчастих Карпат. Характерною особливістю Проміжного ярусу, розкритого в багатьох глибоких свердловин як у районі Борислава та інших ділянок прогину, є те, що він не містить скупчень вуглеводнів. Це при тому, що він ніде не виходить на денну поверхню, тобто задовільно екранований. Структурно він є південно-західним продовженням першого ярусу складок Бориславсько-Покутського покриву. Видима протяжність виходу утворень проміжного ярусу по лінії розрізу I–I (рис. 2) становить 6 км. Поляницько-воротищенські відклади у розрізі свердловини 2-Новосхідницька з вибоєм на глибині 6020 м розкриті від краю насуву Берегової скиби на віддалі 14 км. Отже, амплітуда насуву Берегової скиби на Проміжний ярус і моласи становить як мінімум 20 км. Насправді вона більша, оскільки згадана свердловина не розкрила складки третього ярусу. Таким чином, амплітуда переміщення Берегової скиби характеризується величинами, притаманними покривним тектонічним одиницям. Це спростовує висновок деяких геологів про незначну амплітуду насуву між Складчастими Карпатами і Бориславсько-Покутською зоною (Лозиняк, 1996; Лозиняк, & Петрашкевич, 2007). Група геофізиків і нафтовиків висловила ідею про локалізацію Верхньомасловецького нафтового родовища у Проміжному ярусі Карпат. Цей висновок помилковий, бо Верхньомасловецьке родовище локалізоване в п'ятій лусці Берегової скиби, як виводиться з геологічного розрізу по лінії свердловин 30-Нова Східниця – 9-Іваники, який у цій статті не представлено. Однак навіть з розрізу I–I (рис. 2) випливає, що дві луски Проміжного ярусу розташовані глибше лусок Берегової скиби.

***Бориславсько-Покутський покрив Передкарпатського прогину***

Бориславсько-Покутський покрив розташований на північ від Проміжного ярусу і Скибового покриву і насунений на Самбірський покрив. Його південно-західна частина складена крейдово-палеогеновим флішем, на якому зі стратиграфічною, а місцями і зі значною кутовою незгідністю залягають нижньоміоценові моласи. Структурі Бориславсько-Покутського покриву притаманна система лусок-складок. Переважальний розвиток мають антиклінальні складки. Синкліналі більш вузькі і менші за площею. Антиклінальні складки зазвичай нахилені на північний схід. У районі Борислава поширені лежачі складки. Такі складки розірвані насувами по поверхнях, близьких до осьових поверхонь самих складок. Загальна їх дислокація нагадує пластини, насунені одна на одну. Аналіз матеріалів глибокого буріння дає підставу для виділення в Бориславсько-Покутському покриві кількох ярусів складок (рис. 2–5). Вони розділені насувами більшої амплітуди, ніж ті, які розділяють окремі складки. Ці яруси або групи складок можна розглядати як тектонічні одиниці, аналогічні скибам Скибового покриву. Важливо підкреслити, що при аналогічному просторовому розміщенні складок Бориславсько-Покутського покриву нові складки в ньому можна зустріти тільки під насувами верхніх ярусів, причому ці нові складки зміщені на південний захід. Інакше кажучи, не можуть складки нижчих ярусів розташовуватися на північ від складок вищих ярусів. Це може бути ознакою того, що якщо на якійсь ділянці покриву встановлено ярусну послідовність складок бориславського типу, то в північному напрямку вже не буде складок із флішем в основі. Проте цей висновок справедливий лише для району Борислава, де в Бориславсько-Покутському покриві насуви достатньо похилі, що ілюструють рис. 2–5. Він не придатний для інших ділянок цього покриву, де складки мають стрімкіші крила.

***Самбірський покрив Передкарпатського прогину***

Самбірський покрив простягається від кордону з Польщею до кордону з Румунією, поступово звужуючись у південно-східному напрямку. Він насунений на платформну частину прогину. Покрив складений двома комплексами міоцену, між якими існує кутове неузгодження. Нижній, воротищенсько-балицький комплекс, зазнав інтенсивної лінійної складчастості. В його структурі переважають синклінальні складки, поділені вузькими антиклінальними складками. Верхній, баден-сарматський комплекс, менш дислокований і поширений локально. Омолодження віку стратонів покриву в північно-східному напрямку свідчить про міграцію зони прогинання неогенового басейну в згаданому напрямку.

Головним критерієм для виділення цієї структурної одиниці є не розпливчасті фаціально-літологічні параметри, а відсутність флішової основи для відкладів міоцену (Буров та ін., 1969; Глушко, & Круглов, 1977). Цей критерій дає підставу для розмежування Бориславсько-Покутського та Самбірського покривів. Південну частину останнього М. Ладиженський виділяв під назвою Трускавецької підзони. Він припускав, що в її основі може бути фліш (Ладыженский, 1955), проте результати численних глибоких свердловин, пробурених пізніше в її межах, не підтвердили це припущення. У південній частині Самбірського в межах Бориславського та Тустановицького блоків виявлено три луски (див. рис. 1, 3, 4). У фронтальних частинах вони складені відкладами нижньоворотищенської підсвіти. У двох південних лусках приблизно в середніх частинах присутні загорські верстви. Третя луска представлена на поверхні відкладами засолонених та загіпсованих глин верхньоворотищенської підсвіти. У блоці Помірки південна луска має антиклінальну будову (див. рис. 5). Вона зім'ята в систему синкліналь-антикліналь. Синклінальна частина складена верхньоворотищенськими відкладами, антиклінальна – нижньоворотищенськими, причому покрівельна її частина представлена загорськими верствами. Ширина цієї частини Самбірського покриву сягає 4–6 км.

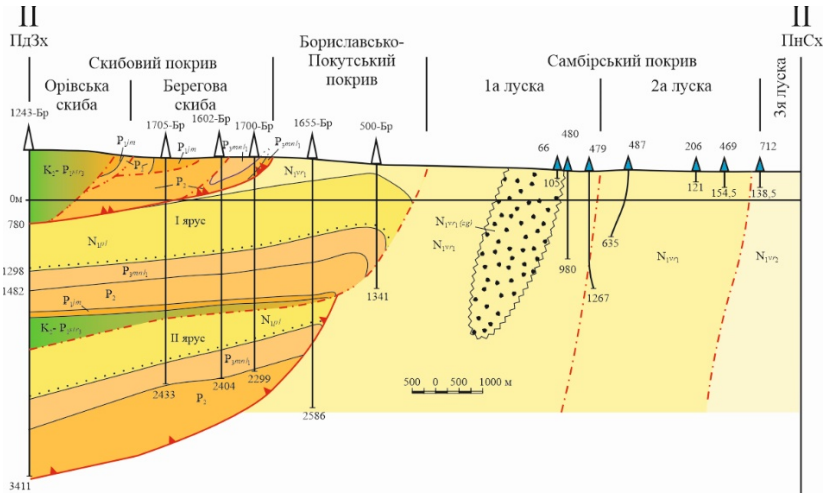



**Рис. 3. Розріз по лінії свердловин 1243-Борислав-712 (гідрогеологічна) (склали М. Павлюк, О. Савчак)**
*Примітка*: умовні позначення (див. рис. 2).

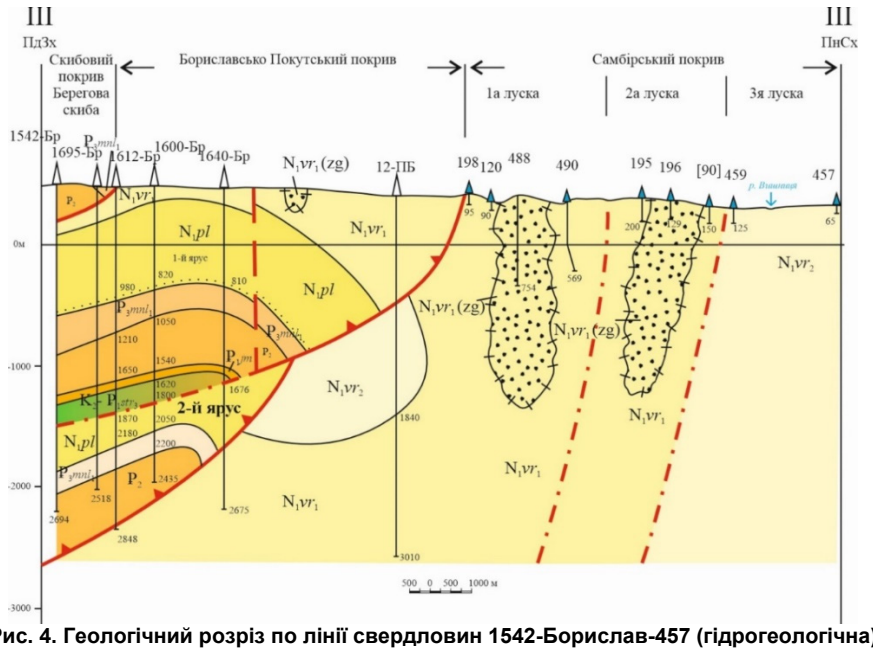



**Рис. 4. Геологічний розріз по лінії свердловин 1542-Борислав-457 (гідрогеологічна) (склали В. Шлапінський, Є. Кондратюк)**
*Примітка*: умовні позначення (див. рис. 2).

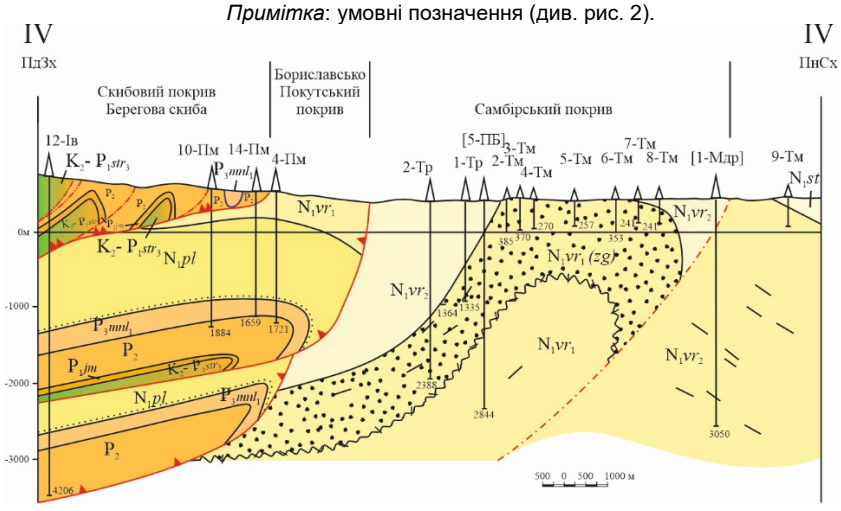



**Рис. 5. Геологічний розріз по лінії свердловин 12-Іваники–9-Трускавець–Модричі (склали Я. Лазарук, В. Шлапінський)**
*Примітка*: умовні позначення (див. рис. 2).

ISSN 1728-3817

***Характер покривних та постпокривних тектонічних рухів.*** У районі Борислава обидва крила насуву Берегової скиби на моласи неначе охоплюють з обох боків центральну частину (Tołwiński, 1937a). Цей факт відзначили також Г.Н. Доленко та В.В. Глушко, які зауважили, що фронтальна лінія Берегового насуву на Бориславській ділянці вигинається на південний захід. Глибоким бурінням тут встановлена Бориславська глибинна складка, яка належить вже до Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Ці дослідники вважали, що рух алохтону загальмувало підняття у фундаменті, розташоване в районі Орова (Доленко, 1962; Глушко, 1968). Однак вельми похилі насуви на цій ділянці свідчать про низьке гіпсометричне положення фундаменту під час просування алохтону. Фундамент тут піднявся пізніше. Якщо час формування насувів у цій частині Карпат і Бориславсько-Покутського покриву прийняти як доверхньобаденсько-нижньосарматський (Клиточенко, Анцупов, & Вуль, 1964), то диференційовані вертикальні рухи в карпатському регіоні зафіксовані у пліоцен-плейстоцені (Гофштейн, 1995). Тоді ж розпочалася постпокривна денудація карпатських мас, висунутих на північний схід по системі похилих насувів і піднятих пізніше. Особливо інтенсивно денудаційні процеси проявляються в зонах інтенсивного піднесення території. Це пояснює поведінку Берегового насуву на Бориславській ділянці. Вважаємо, що подібний генезис утворення і структури Майданського піввікна.

Складки Бориславсько-Покутського покриву перетинаються великою кількістю поперечних розривів, які розділяють їх на окремі блоки (рис. 1). Площини розривів вертикальні або занурюються під кутами, близькими до вертикалі. За характером переміщення це скидо-зсуви з різними амплітудами горизонтального та вертикального зміщення. Декотрі з них перетинають і відклади Складчастих Карпат та частину моласового комплексу, а деякі порушують і ті, і інші. Скидо-зсуви виникали головно в результаті різного опору з боку параавтохтону та автохтону в процесі насування алохтону. Окремої уваги заслуговують глибинні розломи, проте в цій статті вони не розглядатимуться.

**Результати**

Доведено присутність засолонених горизонтів у розрізі поляницької світи, що раніше приймалось за ознаки воротищенської світи і призводило до суттєвих помилок у структурних побудовах. Джерелом для екзотичних конгломератів у поляницько-воротищенських відкладах була кордильєра всередині моласового басейну осадконагромадження. У Береговій скибі відсутні поляницькі відклади неогену. Вперше в районі Борислава виділено Проміжний ярус – пограничну структуру між Скибовим та Бориславсько-Покутським покривами. Структурно він тяжіє до Бориславсько-Покутського покриву. Вперше в районі Борислава у складі Берегової та Орівської скиб виділено п'ять та вісім лусок відповідно. Обґрунтовано варіант пояснення явища, що виражено у відступанні лінії насуву Карпат у районі Борислава на південний захід. Сформульовано принцип, згідно з яким, якщо на якійсь ділянці Бориславсько-Покутського покриву встановлено ярусну послідовність похилих складок бориславського типу, то в північному напрямку вже не буде їх із флішем в основі.

**Дискусія і висновки**

Складено великомасштабну геологічну карту ділянки Борислав–Модричі–Трускавець та чотири геологічні розрізи. Доведено велику амплітуду насуву Складчастих Карпат на Бориславсько-Покутський покрив. Запропоновано схему формування тектонічних дислокацій ділянки Борислав–Модричі–Трускавець.

**Внесок авторів:** Володимир Шлапінський – складання графічних додатків, написання тексту та формування списку літератури, Мирослав Павлюк, Ярослав Лазарук, Олеся Савчак: складання графічних додатків, написання тексту та формування списку літератури, Мирослав Тернавський – участь у складанні геологічної карти та програмне забезпечення.

**Джерела фінансування.** Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

**Список використаних джерел**

Алферьев, Г. П. (1949). К вопросу о тектоническом и стратиграфическом положении трускавецких конгломератов г. Борислава. *Труды Карпатского НИИМинг*, 1, 74–88.

Бодлак, П. М., Цьоха, О. Г., Колос, В. Я., Алексеєва, М. Я., Михалевич, Л. В., & Ковальський, О. І. (2002). Перспективи відкриття нових родовищ нафти та газу на невеликих глибинах в Складчастих Карпатах. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, 3(4), 74–77.

Буров, В. С., Глушко, В. В., Шакин, В. А., & Шпак, П. Ф. (1969). К вопросу о северо-восточной границе распространения флиша во Внутренней зоне Предкарпатского прогиба. *Геологический журнал*, 29(3), 3–12.

Ващенко, В. О., & Гнилко, О. М. (2003). Про стратиграфію соленосних молас Українського Прикарпаття. *Збірник наукових праць УкрНДГРІ*, 2, 71–78.

Ващенко, В. О., Андреєва-Григорович, А. С., Гнилко, О. М., Потилицький, Д. В., & Трофимович, Н. А. (2009). *Літолого-фаціальний аналіз розрізів міоценових молас Бориславсько-Покутської та Самбірської структурно-фаціальних зон Передкарпатського прогину з метою модернізації стратиграфічної схеми* (Звіт). Львівська ГРЕ, ДП "Західукргеологія". Фонди ДП "Західукргеологія".

Вялов, О. С. (1951). Замечания о палеогеновом флише Борислава. *Доклады АН СССР*, 77(3), 465–468.

Вялов, О. С., Гавура, С. П., Даныш, В. В., & Медведев, А. П. (1984). Принципиальные вопросы тектоники Запада Украины. *Геологічний журнал*, 45(2), 1–10.

Глушко, В. В. (1968). *Тектоника и нефтегазоносность Карпат и прилегающих прогибов*. Недра.

Глушко, В. В., & Круглов, С. С. (Ред.). (1971). *Геологическое строение и горючие ископаемые Советских Карпат* (Труды УкрНИГРИ, XXV). Недра.

Глушко, В. В., Лозыняк, П. Ю., & Петрашкевич, М. Й. (1982). Новые представления о строении и районировании Предкарпатского прогиба. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 58, 19–31.

Гнилко, О. М., & Ващенко, В. О. (2004). Еволюція Бориславсько-Покутського та Самбірського покривів та тектонічна позиція міоценових моласових басейнів Українського Передкарпаття. *Геодинаміка*, 4(1), 24–32.

Гофштейн, И. Д. (1995). *Геоморфологический очерк Украинских Карпат*. Наукова думка.

Доленко, Г. Н. (1962). *Геология нефти и газа Карпат*. Наукова думка.

Клиточенко, И., Анцупов, П., & Вуль, М. (1964). О времени складкообразования во внутренней зоне Предкарпатского тпрогиба. *Нефтяная и газовая геология* (с. 8–70). Недра.

Круглов, С. С. (1999). На захист Передкарпатського прогину. *Геодинаміка*, 2(1), 88–91. https://science.lpnu.ua/uk/node/8037

Круглов, С. С., Смирнов, С. Е., Спитковская, С. М., Фильштынский, Л. Е., & Хижняков, А. В. (1985). *Геодинамика Карпат*. Наукова думка.

Кульчицкий, Я. О., & Хлопонин, К. Л. (1957). О возрасте ямненских песчаников (Восточные Карпаты). *Геология нефти*, 9, 31–35.

Ладыженский, Н. Р. (1955). *Геология и газонефтеносность Советского Предкарпатья*. Изд-во АН УССР.

Ладыженский, Н. Р., & Антипов, В. И. (1961). *Геологическое строение и газонефтеносность Советского Предкарпатья*. Гостоптехиздат.

Лозиняк, П. Ю. (1996). Нові погляди на будову Передкарпатського прогину. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 96–97(3–4), 80–90.

Лозиняк, П. Ю. (2001). До вивчення геологічної будови Карпатської споруди. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 4, 64–70.

Лозиняк, П., & Петрашкевич, М. (2007). Основні принципи і схема тектонічного районування Українських Карпат. *Праці Наукового товариства імені Шевченка. Геологічний збірник*, XIX, 50–61.

Маєвський, Б. Й., Жученко, Г. О., & Мончак, Л. С. (2004). Сучасний погляд на геодинамічні процеси та конгломератоутворення у Передкарпатському прогині. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*, 11(2), 56–59.

Марченко, Т. Ю. (2004). Значення гальки домезозойських порід для вирішення проблем палеогеографії та тектоніки Українських Карпат. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 2, 114–118.

Мончак, Л. С., & Мончак, Ю. Л. (2002). Геодинамічні процеси в карпатському регіоні та конгломератоутворення. *Геологія та розвідка нафтових і газових родовищ*, 4(3), 61–62.

Никулина, Т. В., & Колтун, В. И. (1953). *Отчет о поисковых работах на свинцово-цинковом месторождении Трускавец и поисково-*

*съемочных работах в его окрестностях в 1949–1952 г.г.* ЛГЭ треста "Киевгеология". Фонди ДП "Західукргеологія".

*Обоснование направлений поисков нефти и газа в глубокозалегающих горизонтах Украинских Карпат.* (1977). (В. В. Глушко & С. С. Круглов, Ред.). Наукова думка.

Сафаров, И. П., Столяр, Л. Н., Окунев, В. И., & Предтеченская, Н. С. (1962). *Анализ и обобщение геологических материалов по площадям... и обоснование дальнейшего направления разведочных работ* (Отчет по теме 474). УкрНИГРИ.

Ступка, О. С. (2008). Джерело осадів Карпатського флішу – геодинамічний аспект. *Геодинаміка*, 7(1), 39–46.

*Тектоника Украинских Карпат: объяснительная записка к тектонической карте Украинских Карпат: масштаб 1:200000.* (1986). (С. С. Круглов, Отв. ред.). УкрНИГРИ.

Федущак, М. Ю. (1962). *Умови утворення екзотичних конгломератів воротищенської серії Передкарпаття*. Вид-во АН УССР.

Шлапінський, В. (2012). Про границю між олігоценом і міоценом в Бориславсько–Покутському покрові Передкарпатського прогину і Складчастих Карпатах. *Праці Наукового товариства імені Шевченка. Геологічний збірник*, XXX, 100–118.

Шлапінський, В., & Тернавський, М. (2020). Про поділ Передкарпатського краєвого прогину. У Р. Лещух, Ю. Крупський, М. Павлунь, А. Іваніна, І. Шайнога, Г. Гоцанюк, & І. Мар'яш (Ред.), *Проблеми геології фанерозою України* (с. 78–81). Львівський національний університет імені Івана Франка.

Шлапінський, В., Павлюк, М., & Тернавський, М. (2020). Критичний розгляд проблемних питань стратиграфії і тектоніки Складчастих Карпат і прилеглих територій на прикладі Держгеолкарти-200. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 182(1), 5–39. https://doi.org/10.15407/ggcm2020.01

Цар, М. (2018). Конгломерати з екзотичним матеріалом в українських Карпатах – поширення, склад, ймовірний генезис. *Геодинаміка*, 1(24), 40–50.

Cizancourt, H. D. (1925). *O budowie przedmurza Polskich Karpat Wschodnich* (Biuletyn nr 12, 48 s.). Stacja Geologiczna w Borysławiu.

Kropaczek, B. (1919). *Studjum geologiczne według materiałów zebranych przez śp. Kropaczka zestawił prof. J. Grzybowski*. Druk. Un-tu Jagiellońskiego.

Tołwiński, K. (1937a). *Kopalnie nafty i gazów ziemnych w Polsce* (Vol. 2).

Tołwiński, K. (1937b). *Objaśnienie arkusza Skole (pas 52, słup 37)*. PIG.

**References**

Alferev, G. P. (1949). On the tectonic and stratigraphic position of the Truskavets conglomerates of Boryslav. *Trudy Karpatskogo NIIMing*, 1, 74–88 [in Russian].

Bodlak, P. M., Tsiokha, O. H., Kolos, V. Ya., Alekseieva, M. Ya., Mykhalevych, L. V., & Kovalskyi, O. I. (2002). Prospects for the discovery of new oil and gas fields at shallow depths in the Folded Carpathians. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu*, 3(4), 74–77 [in Ukrainian].

Burov, V. S., Glushko, V. V., Shakin, V. A., & Shpak, P. F. (1969). On the question of the northeastern boundary of flysch distribution in the Inner Zone of the Precarpathian Foredeep. *Geologicheskiy zhurnal*, 29(3), 3–12 [in Russian].

Cizancourt, H. D. (1925). *O budowie przedmurza Polskich Karpat Wschodnich* (Biuletyn nr 12, 48 s.). Stacja Geologiczna w Borysławiu [in Polish and French].

Dolenko, G. N. (1962). *Geology of oil and gas of the Carpathians*. Naukova Dumka [in Russian].

Fedushchak, M. Yu. (1962). *Conditions of formation of exotic conglomerates of the Vorotyshche series of the Precarpathians*. Vyd-vo AN URSR [in Ukrainian].

Glushko, V. V. (1968). *Tectonics and oil and gas potential of the Carpathians and adjacent foredeeps*. Nedra [in Russian].

Glushko, V. V., & Kruglov, S. S. (Eds.). (1971). *Geologicheskoe stroenie i goryuchie iskopaemye Sovetskikh Karpat* (Trudy UkrNIGRI, XXV) [Geological structure and combustible minerals of the Soviet Carpathians]. Nedra [in Russian].

Glushko, V. V., Lozyniak, P. Yu., & Petrashkevych, M. Y. (1982). New concepts on the structure and zoning of the Precarpathian Foredeep. *Heolohiia i heokhimiia horiuchykh kopalyn*, 58, 19–31 [in Russian].

Hnilko, O. M., & Vashchenko, V. O. (2004). Evolution of the Boryslav-Pokuttia and Sambir nappes and the tectonic position of the Miocene molasse basins of the Ukrainian Precarpathians. *Heodynamika*, *4*(1), 24–32 [in Ukrainian].

Hofshtein, I. D. (1995). *Geomorphological sketch of the Ukrainian Carpathians*. Naukova Dumka [in Russian].

Klytochenko, I., Antsupov, P., & Vul, M. (1964). On the time of folding in the inner zone of the Precarpathian Foredeep. *Neftyanaya i gazovaya geologiya*, 8–70 [in Russian].

Kropaczek, B. (1919). *Studjum geologiczne według materiałów zebranych przez śp. Kropaczka zestawił prof. J. Grzybowski*. Druk. Un-tu Jagiellońskiego [in Polish].

Kruglov, S. S. (1999). In defense of the Precarpathian Foredeep. *Heodynamika*, 2(1), 88–91. [in Ukrainian]. https://science.lpnu.ua/uk/node/8037

Kruglov, S. S., Smirnov, S. E., Spitkovskaia, S. M., Filshtynskyi, L. E., & Khizhniakov, A. V. (1985). *Geodynamics of the Carpathians*. Naukova Dumka [in Russian].

Kulchytskyi, Ya. O., & Khloponin, K. L. (1957). On the age of the Yamna sandstones (Eastern Carpathians). *Geologiya nefti*, 9, 31–35 [in Russian].

Ladyzhenskyi, N. R. (1955). *Geologiya i gazoneftenosnost Sovetskogo Predkarpatya* [Geology and oil and gas potential of the Soviet Precarpathians]. Izd-vo AN URSR [in Russian].

Ladyzhenskyi, N. R., & Antipov, V. I. (1961). *Geological structure and oil and gas potential of the Soviet Precarpathians*. Gostoptekhizdat. [in Russian].

Lozyniak, P. Yu. (1996). New views on the structure of the Precarpathian Foredeep. *Heolohiia i heokhimiia horiuchykh kopalyn*, 96–97(3–4), 80–90 [in Ukrainian].

Lozyniak, P. Yu. (2001). To the study of the geological structure of the Carpathian edifice. *Heolohiia i heokhimiia horiuchykh kopalyn*, 4) 64–70 [in Ukrainian].

Lozyniak, P., & Petrashkevych, M. (2007). Basic principles and scheme of tectonic zoning of the Ukrainian Carpathians. *Pratsi Naukovoho tovarystva imeni Shevchenka. Heolohichnyi zbirnyk*, XIX, 50–61 [in Ukrainian].

Maievskyi, B. Y., Zhuchenko, H. O., & Monchak, L. S. (2004). Modern view on geodynamic processes and conglomerate formation in the Precarpathian Foredeep. *Rozvidka i rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 11(2), 56–59 [in Ukrainian].

Marchenko, T. Yu. (2004). Significance of the pebbles of pre-Mesozoic rocks for solving the problems of paleogeography and tectonics of the Ukrainian Carpathians. *Heolohiia i heokhimiia horiuchykh kopalyn*, 2, 114–118 [in Ukrainian].

Monchak, L. S., & Monchak, Yu. L. (2002). Geodynamic processes in the Carpathian region and conglomerate formation. *Heolohiia ta rozvidka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 4(3), 61–62 [in Ukrainian].

Nikulina, T. V., & Koltun, V. I. (1953). *Report on prospecting works for the Truskavets lead-zinc deposit and reconnaissance surveys in its vicinity in 1949–1952*. LHE tresta "Kievgeologiya", Fondy DP "Zakhidukrheolohiia" [in Russian].

Safarov, I. P., Stoliar, L. N., Okunev, V. I., & Predtechenskaia, N. S. (1962). *Analysis and generalization of geological materials on areas... and substantiation of the further direction of exploration work* (Report on Theme 474). UkrNIGRI [in Russian].

Shlapinskyi, V. (2012). On the boundary between the Oligocene and Miocene in the Boryslav–Pokuttia Nappe of the Precarpathian Foredeep and the Folded Carpathians. *Pratsi Naukovoho tovarystva imeni Shevchenka. Heolohichnyi zbirnyk*, (XXX), 100–118 [in Ukrainian].

Shlapinskyi, V., & Ternavskyi, M. (2020). On the division of the Precarpathian marginal foredeep. In R. Leshchuk, Yu. Krupskyi, M. Pavlun, A. Ivanina, I. Shainoha, H. Hotsaniuk, & I. Maryash (Eds.), *Problemy heolohii fanerozoiu Ukrainy* [Problems of Phanerozoic geology of Ukraine] (pp. 78–81). Lviv National Ivan Franko University [in Ukrainian].

Shlapinskyi, V., Pavliuk, M., & Ternavskyi, M. (2020). Critical review of problematic issues of stratigraphy and tectonics of the Folded Carpathians and adjacent territories based on the example of the State Geological Map-200. *Heolohiia i heokhimiia horiuchykh kopalyn*, 1(182), 5–39. https://doi.org/10.15407/ggcm2020.01 [in Ukrainian].

Stupka, O. S. (2008). Source of the Carpathian flysch sediments – geodynamic aspect. *Heodynamika*, 7(1), 39–46 [in Ukrainian].

*Substantiation of directions for oil and gas exploration in deep-seated horizons of the Ukrainian Carpathians*. (1977). (V. V. Glushko & S. S. Kruglov, Eds.). Naukova Dumka [in Russian].

*Tectonics of the Ukrainian Carpathians: explanatory note to the tectonic map of the Ukrainian Carpathians: scale 1:200000*. (1986). (S. S. Kruglov, Ed.). UkrNIGRI [in Russian].

Tołwiński, K. (1937a). *Kopalnie nafty i gazów ziemnych w Polsce* (Vol. 2). K. Tołwiński [in Polish].

Tołwiński, K. (1937b). *Objaśnienie arkusza Skole (pas 52, słup 37)*. PIG [in Polish].

Tsar, M. (2018). Conglomerates with exotic material in the Ukrainian Carpathians – distribution, composition, probable genesis. *Heodynamika*, 1(24), 40–50 [in Ukrainian].

Vashchenko, V. O., & Hnilko, O. M. (2003). On the stratigraphy of the salt-bearing molasses of the Ukrainian Precarpathians. *Zbirnyk naukovykh prats UkrNDHRI*, 2, 71–78 [in Ukrainian].

Vashchenko, V. O., Andrieieva-Hryhorovych, A. S., Hnilko, O. M., Potylitskyi, D. V., & Trofymovych, N. A. (2009). Lithofacies analysis of Miocene molasses sections of the Boryslav-Pokuttia and Sambir structural-facial zones of the Precarpathian Foredeep with the aim of stratigraphical scheme modernization (Report). Lvivska HRE, DP "Zakhidukrheolohiia", Fondy DP "Zakhidukrheolohiia" [in Ukrainian].

Vyalov, O. S. (1951). Remarks on the Paleogene flysch of Boryslav. *Doklady AN SSSR*, 77(3), 465–468 [in Russian].

Vyalov, O. S., Havura, S. P., Danysh, V. V., & Medvedev, A. P. (1984). Principal issues of the tectonics of Western Ukraine. *Heolohichnyi zhurnal*, 45(2), 1–10 [in Russian].

**Отримано редакцією журналу / Received: 29.06.25**
**Прорецензовано / Revised: 13.08.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Volodymyr SHLAPINSKY[1], PhD (Geol.)**
**ORCID ID: 0009-0009-0403-8421**
**e-mail: vlash.ukr@gmail.com**

**Myroslav PAVLYUK[1], DSc (Geol. & Mineral.), Prof., Active Member of the National Academy of Sciences of Ukraine**
**ORCID ID: 0000-0001-8741-0624**
**e-mail: pavlyuk.myroslav@gmail.com**

**Yaroslav LAZARUK[1], DSc (Geol.)**
**ORCID ID: 0009-0002-2016-3424**
**e-mail: lazarukjaroslav@gmail.com**

**Olesya SAVCHAK[1], PhD (Geol.)**
**ORCID ID: 0000-0003-1491-7613**
**e-mail: savchakolesya@gmail.com**

**Myroslav TERNAVSKY[1], Leading Engineer**
**ORCID ID: 0000-0003-3520-847X**
**e-mail: matrix5@ukr.net**

**[1]Institute of Geology & Geochemistry of Combustible Minerals of NASU, Lviv, Ukraine**

# A NEW LOOK AT THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE BORYSLAV–MODRYCHI–TRUSKAVETS SECTION OF THE UKRAINIAN CARPATHIANS AND PRECARPATHIANS

**Background.** *This area is located in the Boryslav-Modrychy-Truskavets triangle. It contains deposits belonging to five tectonic units (from southwest to northeast). These are: the leading part of the Skib nappe of the Folded Carpathians, the so-called Intermediate Stage, the Boryslav-Pokutsky nappe, the Truskavets tectonic element and the Sambir nappe. They are composed of rocks of the flysch formation of the Upper Cretaceous-Oligocene age interval and a molasse complex of rocks. In the first two units, there are rocks only of the flysch formation. In the Boryslav-Pokutsky nappe, on a flysch base with erosion and stratigraphic unconformity, rocks of the molasse formation occur, represented by the Polyanytsya, Vorotyschensky, and in places stratigraphically higher and Stebnitsya suites. In the Truskavets tectonic element and the Sambir nappe, there are no flysch rocks as links of a normal sequential section. In the latter, rocks of the Lower Vorotyshchen subsections are unknown. In all three tectonic units, where the molasse complex is present, it contains coarse-grained strata: Truskavets conglomerates and olistostrome, which were formed from the erosion of older rocks and flysch deposits. The article considers issues related to the stratigraphy and tectonics of flysch and molasse formation deposits.*

**Methods.** *Structural-tectonic, lithological, geological-geophysical, geochemical, hydrogeological.*

**Results.** *In the Boryslav area, both wings of the Coastal Slope thrust on molasses seem to cover the central part on both sides. The source for exotic conglomerates in the Polyanytsia-Vorotyschenskaya deposits was the cordillera within the molasse basin of the sedimentary accumulation. Polyanytsia Neogene deposits are absent in the Berehoveya Skiba.There is principle, according to which, if a tiered sequence of inclined folds of the Boryslav type is established on some section of the Boryslav-Pokutsky nappe, then in the northern direction there will no longer be any of them with flysch at the base. This fact was noted by researchers who noticed that the frontal line of the Coastal Slope in the Boryslav section bends to the southwest. Deep drilling has established the Boryslav deep fold here, which already belongs to the Inner Zone of the Precarpathian Trough. These researchers believed that the movement of the allochthon was slowed down by the uplift in the basement, which is located in the Orov area. However, the very steep thrusts in this area indicate a low hypsometric position of the basement during the advance of the allochthon. The foundation here rose later. If the time of formation of thrusts in this part of the Carpathians and the Boryslav–Pokutsky nappe is accepted as pre-Upper Badenian-Lower Sarmatian, then differentiated vertical movements in the Carpathian region were recorded in the Pliocene-Pleistocene. At the same time, post-nappe denudation of the Carpathian masses, pushed to the northeast along the system of inclined thrusts and raised later, began. Denudation processes are particularly intense in areas of intense uplift of the territory. This explains the behavior of the Coastal Thrust in the Boryslav section. We believe that the genesis of the formation and structure of the Maidan part is similar. The folds of the Boryslav–Pokutsky nappe are intersected by a large number of transverse faults, which divide them into separate blocks (Fig. 1). The fault planes are vertical or dip at angles close to the vertical. By the nature of the movement, these are strike-slip faults with different amplitudes of horizontal and vertical displacement. Some of them cross both the sediments of the Folded Carpathians and part of the Molasse Complex, and some disrupt both. The landslides occurred mainly as a result of different resistance from the parautochthon and autochthon in the process of thrusting the allochthon.*

**Conclusions.** *The geological map of the Boryslav-Modrychi-Truskavets section has been revised to a scale of 1:25,000 and four geological sections. For the first time in the Boryslav region, the Intermediate Layer has been identified – a structure between the Skybov and Boryslav-Pokutsky layers. For the first time in the Boryslav region, five and eight scales have been identified, respectively, in the Berehove and Orivska layers. The presence of saline horizons in the section of the Polyanytsya formation has been proven, which was previously considered to be signs of the Vorotyshchenskaya formation and led to significant errors in structural construction. The large amplitude of the thrust of the Folded Carpathians onto the Boryslav-Pokutsky nappe is proven. A substantiated version of the explanation of the phenomenon, which is expressed in the retreat of the Carpathian thrust line in the Boryslav region to the southwest, is proposed. A scheme of the formation of tectonic dislocations in the Boryslav-Modrychi-Truskavets section is proposed.*

**Keywords:** *flysch, molasses, nappes, fragments, scales, Truskavets conglomerates, olistostrome.*

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

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

# ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.02

Сергій ВИЖВА[1], д-р. геол. наук, проф., чл.-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 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.
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

# ЕЛЕКТРИЧНІ ПАРАМЕТРИ КАРБОНАТНИХ ПОРІД ГНІДИНЦІВСЬКОГО НАФТОГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА ГЛИНСЬКО-СОЛОХІВСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РАЙОНУ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф., член-кор. НАНУ Михайлом ОРЛЮКОМ)*

**В с т у п .** ***Висвітлено результати визначення електричних параметрів карбонатних порід верхнього карбону Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища Глинсько-Солохівського газоконденсатного району з метою комплексного аналізу їх фізичних властивостей.***

**М е т о д и .** ***Виконано короткий петрографічний опис вапняків. Визначено питомий електричний опір та відносну діелектричну проникність. Для визначення цих параметрів застосовувалась лабораторна електрометрична установка на базі прецизійного RLC-метра MHC-1100 та спеціального кернотримача.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***Досліджено такі електричні характеристики зразків порід, як питомий і відносний (параметр пористості) електричний опір та відносна діелектрична проникність.***

***Наведено межі змін та середні значення цих параметрів для досліджених порід.***

**В и с н о в к и .** ***За допомогою кореляційного аналізу встановлено ряд кореляційних залежностей між фільтраційно-ємнісними властивостями досліджених порід та електричними параметрами в атмосферних і пластових умовах. Ці залежності можуть бути використані при інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів карбонатних порід-колекторів.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***вапняки, питомий електричний опір, відносний електричний опір, відносна діелектрична проникність, кореляційні залежності.***

## Вступ

***Постановка проблеми***. Поклади вуглеводнів в карбонатних колекторах посідають особливе місце серед джерел видобутку нафти та газу. Вони часто представлені слабкопроникними, низькопористими гірськими породами (Михайлов та ін., 2014). Наявність карбонатних покладів вуглеводнів встановлено в багатьох регіонах світу, в тому числі в Україні (Дніпровсько-Донецька западина, далі – ДДЗ). Карбонатні породи в деяких регіонах містять значну кількість органіки й можуть слугувати як материнськими породами, так і колекторами газу. Новітні технології видобутку газу на основі гідророзриву пласта змінили ставлення до цих відкладів. З багатих органікою карбонатних порід можна добувати газ у великих обсягах і з економічно прийнятною за нинішніх умов собівартістю.

Карбонатні колектори за цілою низкою ознак відрізняються від теригенних порід традиційних родовищ нафти та газу. Для карбонатних колекторів характерне регіональне поширення.

При вивченні карбонатних колекторів важливу роль відіграють геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання, на основі яких визначаються напрямки горизонтального стовбура свердловини і параметри гідророзриву пласта.

У статті висвітлено електричні параметри карбонатних порід, представлених мікрито-спаритовими та доломітизованими піщанистими вапняками верхнього карбону Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища Глинсько-Солохівського газоконденсатного району (ГКР). Характеристика фізичних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ карбонатних колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

***Аналіз публікацій за темою досліджень***. Вивченню фізичних властивостей порід нафтогазоперспективних районів України присвячена низка публікацій (Вижва та ін., 2019; 2020а; 2020б; 2021; Iuras et al., 2023; Карпенко та ін., 2014; 2015; Маслов, Онищук, & Шинкаренко, 2017; Михайлов, Вижва, & Загнітко, 2014; Орлюк, & Друкаренко, 2013; Орлюк, & Пашкевич, 2011; Orlyuk et al., 2018; Пашкевич, Орлюк, & Лебедь, 2014; Садівник та ін., 2013; Соболь, & Карпенко, 2021; Старостенко, & Русаков, 2015; Vyzhva et al., 2017) та багатьох інших авторів. Петрофізичні параметри порід мають важливе

© Вижва Сергій, Онищук Віктор, Онищук Іван, Рева Микола, Шабатура Олександр, 2025

ISSN 1728-3817

значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень, тому їх лабораторним дослідженням приділяється значна увага. При цьому петрофізичні параметри порід і кореляційні залежності між ними мають досить виражений індивідуальний характер щодо кожної ділянки досліджень. Отже, лабораторне визначення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують виконання як окремих досліджень, так і окремого публічного висвітлення їх результатів.

***Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми***. На сучасному етапі проблема пошуків та вивчення карбонатних джерел вуглеводнів на території України є надзвичайно актуальною, зважаючи на ситуацію з енергоносіями у світі. Тому вивчення петрофізичних властивостей гірських порід з метою оцінки перспективності геологічних структур і комплексів на вуглеводні має важливе значення. Як вже зазначалося, петрофізичні властивості порід необхідні для інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин, а також при оцінці параметрів гідророзриву пласта.

Незважаючи на значну кількість відповідних публікацій, для карбонатних порід практично відсутні дані їх лабораторних електрометричних досліджень і кореляційних залежностей між фільтраційно-ємнісними та електричними параметрами для конкретних площ і утворень. Слід відзначити, що петрофізичні дослідження були спрямовані переважно на вивчення теригенних порід-колекторів і на даному етапі петрофізичні параметри карбонатних порід слабко вивчені.

***Мета досліджень*** – оцінка електричних властивостей карбонатних порід-колекторів верхнього карбону Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища Глинсько-Солохівського ГКР як основи комплексного аналізу їх фізичних властивостей.

Встановлено, що кореляційні зв'язки між ємнісно-фільтраційними та електричними параметрами, а також даними свердловинних і польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Комплекс лабораторних петрофізичних досліджень є основою для визначення цих зв'язків. Дані, отримані в результаті лабораторних досліджень про зміни їх питомого електричного опору та їх кореляційні зв'язки із фільтраційно-ємнісними параметрами, використовуються для інтерпретації результатів електрометричних методів досліджень свердловин і польової електророзвідки.

**Методи**

***Експериментальні дослідження*** виконано в науково-дослідній лабораторії теоретичної і прикладної геофізики (НДЛ ТПГ) ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка. Комплекс петрофізичних досліджень включав визначення: густини порід; відкритої та ефективної пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах (Вижва та ін., 2019, 2020 б, 2021; Vyzhva, Onyshchuk, & Onyshchuk, 2017). Виконано також петрографічні дослідження. Усі лабораторні вимірювання виконувалися відповідно до чинних нормативних документів.

У статті наведено результати комплексних досліджень електричних властивостей колекції із 44 зразків карбонатних порід верхнього карбону Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища Глинсько-Солохівського ГКР. Досліджені породи представлені мікрито-спаритовими та доломітизованими піщанистими вапняками із свердловин 250, 278, 280 (інтервал глибин 1760–1900 м).

За матеріалами петрографічних досліджень встановлено, що зверху інтервалу залягають тонкокристалічні (спаритові) та пелітоморфні (мікритові) слабодоломітизовані вапняки, які включають малопотужні прошарки піщанистих чи алевролітистих вапняків, або несортованих пісковиків. Кількість та розмір теригенного матеріалу мінлива, окремі зерна досягають розміру грубого псамітового, а пелітоморфний кварц є невід'ємною складовою мікритових відмін (у т. ч. і у спаритах), де він асоціює із глинистою (смектитовою) складовою. Головними ознаками вказаних відмін є забарвлення окремих шарів і прошарків, яке спричинене вмістом у них смектитової складової зеленуватого кольору. Виділяються сірі, іноді злегка буруваті спарити, зеленувато-сірі мікрито-спарити, зелені мікрити та їх світло-сірі, майже білі відміни. Шари та прошарки характеризуються непаралельними, хвилястими, хмароподібними та лінзоподібними обмеженнями.

Нижню частину дослідженого інтервалу складають доломітизовані піщанисті вапняки, в яких власне доломіт разом із теригенною фракцією становить зернисту масу, що цементується мікритовим карбонатом із глинистою речовиною, де ділянки із базальним типом цементації вміщують до 60 % кристалів доломіту. Іноді в породах трапляються плями нафти.

Породи, що описуються, характеризуються наявністю міжзернових пор розміром 0,01−0,03 мм, що часто не сполучаються між собою. Їх внутрішня поверхня і контури підпорядковані численним граням ромбоедрів, що не зрослися між собою. Досить слабка проникність різних відмін вапняку пов'язується з наявністю павутинної системи міжзернових тріщин, які дуже часто виповнюються аморфною глинистою колоїдогенною речовиною, або тектонічних тріщин, які частково виповнені перевідкладеним мікритом, або кірочками кальциту.

Відклади формувалися, вірогідно, в середньоглибинній частині шельфу, де осідав планктон, про що свідчать біоморфні рештки, які становлять основу перекристалізованих спаритових і мікрит-спаритових відмін. В область формування тонкозернистих біоморфних карбонатних осадків періодично поступав теригенний несортований матеріал (можливо шторміти), або перенесений придонними течіями, які привносили в більш глибоководні ділянки разом із теригенним матеріалом фрагменти слабоконсолідованих (можливо водоростями) смектитових кірочок. Осадки носять трансгресивний характер: знизу угору по розрізу спостерігається зменшення потужності та кількості теригенних прошарків. Відзначені текстури опливання осадків формувалися в середині пласта за рахунок неоднорідного літостатичного тиску на діагенетичній стадії після формування кристалів та мікроконкрецій сульфідів. Доломітизація носила вибірковий характер. Вона більш інтенсивно проходила по біоморфних рештках, мінімально – по кальцитовому мікриту. Швидше за все, доломітизація вапняків відбувалася на епігенетичній стадії після (або під час) формування кліважної тріщинуватості. Проте додаткової пористості в цій ділянці розрізу не виникло, у зв'язку із можливим заліковуванням пор та тріщин смектитом і пелітоморфним карбонатом.

За класифікацією Дахнова ці породи належать до III класу колекторів (Дахнов, 1975).

***Методика електрометричних лабораторних досліджень.*** Лабораторні електрометричні вимірювання сухих і насичених гасом та моделлю пластової води зразків керна виконано за допомогою RCL-метра MHC-1100. Прилад дає змогу виконувати високоточні вимірювання електричного опору та діелектричної проникності за

двохелектродною схемою із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (Вижва та ін., 2019; 2020 а,б; 2021; Vyzhva, Onyshchuk, & Onyshchuk, 2017). Циліндричні зразки під час вимірювання поміщались у спеціальний кернотримач, розроблений у НДЛ теоретичної і прикладної геофізики.

Досліджено зміни питомого електричного опору за різного ступеня відгонки води на центрифузі ОС-6М, з метою визначення залежності петрофізичних параметрів від водонасичення порід. У процесі цих досліджень виконано серію вимірювань електричного опору й швидкості пружних хвиль зразків порід, насичених моделлю пластової води, до їх центрифугування та після центрифугування за режимів відгонки від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, що відповідає діапазону зміни тиску витіснення води від 0 до 1 МПа (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися також коефіцієнти водонасичення порід.

З метою встановлення кореляційного зв'язку між електричними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах (температура t=50 °C; ефективний тиск $p_{еф}$=30 МПа; мінералізація пластової води М=190 г/л).

Середня відносна похибка визначення електричного опору порід у рамках виконаних досліджень становила 3,3 %.

**Результати**

***Аналіз даних електрометричних досліджень в атмосферних умовах.*** У результаті лабораторних вимірювань визначено електричні параметри досліджених карбонатних порід, дані про межі змін та середні значення яких наведено в табл. 1.

*Таблиця 1*

**Межі змін і середні значення електричних параметрів порід в атмосферних умовах**

| № | Породи | Значення параметра | Атмосферні умови | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Питомий електричний опір, Ом·м | | | Відносний електричний опір, P | Діелектрична проникність | | |
| | | | сухих | насичені гасом | насичених розчином NaCl | | сухих | насичені гасом | насичених розчином NaCl |
| 1 | Мікрито-спаритові вапняки | мін. | 14826 | 44478 | | | 10,8 | 3,1 | |
| | | макс. | 358639 | 1075917 | | | 41,8 | 9,7 | |
| | | сер. | 62713 | 188138 | | | 25,9 | 5,2 | |
| 2 | Доломітизовані піщанисті вапняки | мін. | 111953 | 307687 | 1,11 | 13,5 | 3,0 | 2,8 | 566 |
| | | макс. | 12146665 | 14449461 | 2,65 | 32,3 | 7,5 | 4,9 | 9565 |
| | | сер. | 1542135 | 3640258 | 1,69 | 20,7 | 4,2 | 3,8 | 3898 |

Лабораторними електрометричними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що питомий електричний опір (ПЕО) мінерального скелета порід (ПЕО сухих екстрагованих зразків) змінюється: для мікрито-спаритових вапняків – від 14,826 до 358,639 кОм·м за середнього значення 62,713 кОм·м; для доломітизованих піщанистих вапняків – від 111,953 кОм·м до 12,147 МОм·м за середнього значення 1,542 МОм·м. Зразки доломітизованих піщанистих вапняків, насичені моделлю пластової води (розчин NaCl з М=190 г/л), мають ПЕО від 1,11 до 2,65 Ом·м за середнього значення 1,7 Ом·м.

Відносний електричний опір порід (параметр пористості Р) – відношення питомого опору повністю насиченої породи ($\rho_{пв}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_в$): $P=\rho_{пв}/\rho_в$ (Дахнов, 1975; Tiab, & Donaldson, 2015) є важливим інформаційним параметром, який широко використовується при геофізичних дослідженнях свердловин (ГДС) електрометричними методами. В результаті виконаних електрометричних досліджень встановлено, що відносний електричний опір доломітизованих піщанистих вапняків змінюється від 13,5 до 32,3 за середнього значення 20,7.

Встановлено кореляційну залежність між коефіцієнтом пористості ($k_п$) і відносним електричним опором для доломітизованих піщанистих вапняків, яка апроксимується рівнянням $P = a \cdot k_п^{-m}$, де *a* – постійний коефіцієнт, *m* – структурний показник (Дахнов, 1975; Tiab, & Donaldson, 2015):

$$P = 0{,}8921 \cdot k_п^{-1{,}529}, \text{ при } R^2 = 0{,}78.$$

Графік цієї залежності наведено на рис. 1.

Параметр збільшення електричного опору (параметр насичення $P_н$) – відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{чв}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{пв}$): $P_н=\rho_{чв}/\rho_{пв}$ (Дахнов, 1975; Tiab & Donaldson, 2015) є важливою геоелектричною характеристикою порід-колекторів. У результаті експериментальних лабораторних досліджень на центрифузі ОС-6М і статистичного аналізу даних електрометричних вимірювань отримано кореляційну залежність параметра $P_н$ від коефіцієнта водонасичення ($k_в$) для доломітизованих піщанистих вапняків, яка апроксимується рівнянням $P_н = b \cdot k_в^{-n}$, де *b* – постійний коефіцієнт, *n* – показник змочуваності, що залежить від ступеня гідрофобності зерен породи (Дахнов, 1975; Tiab, & Donaldson, 2015). Ця залежність для досліджених порід описується степеневим рівнянням

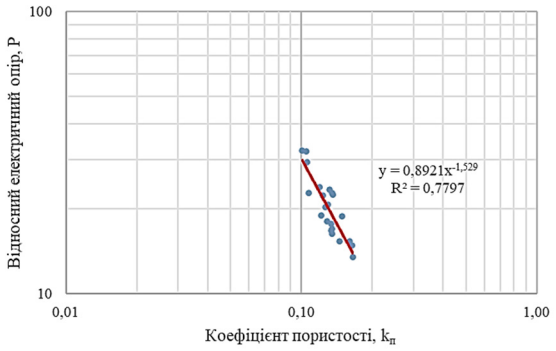



**Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_п$) та відносним електричним опором (Р). Доломітизовані піщанисті вапняки**

$$P_н = 1{,}1988 \cdot k_в^{-1{,}801}, \text{ при } R^2 = 0{,}974.$$

Графік наведеної залежності представлено на рис. 2.

Електричні властивості середовища також можуть бути охарактеризовані діелектричною проникністю, яка є інформативним параметром при вивченні діелектриків і напівпровідників, до яких належить більшість гірських порід. Виділяють відносну, абсолютну і діелектричну проникність вакууму ($\varepsilon$, $\varepsilon_а$, $\varepsilon_о$), між якими існує таке співвідношення: $\varepsilon=\varepsilon_а/\varepsilon_о$. Цей параметр широко

використовується при розв'язанні широкого класу задач (Дахнов, 1975; Tiab, & Donaldson, 2015).

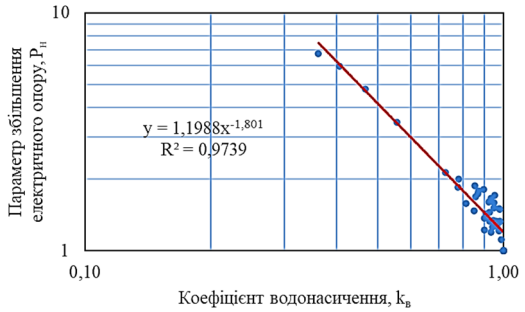



**Рис. 2. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору ($P_н$) та коефіцієнтом водонасичення ($k_в$). Доломітизовані піщанисті вапняки**

У процесі лабораторних досліджень визначено відносну діелектричну проникність (ε) досліджених вапняків з різним ступенем насичення (табл. 1).

Лабораторними електрометричними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що діелектрична проникність (ДП) мінерального скелета порід (ДП сухих екстрагованих зразків) змінюється: для мікрито-спаритових вапняків – від 10,8 до 41,8 за середнього значення 25,9; для доломітизованих піщанистих вапняків – від 3 до 7,5 за середнього значення 4,2. Зразки мікрито-спаритових вапняків, насичені гасом, мають ДП від 3,1 до 9,7 за середнього значення 5,2, а доломітизовані піщанисті вапняки характеризуються значеннями ДП від 2,8 до 4,9 за середнього значення 3,8. Зразки доломітизованих піщанистих вапняків, насичені моделлю пластової води, мають ДП від 566 до 9565 за середнього значення 3898. Слід відзначити, що діелектрична проникність скелета (сухий стан) мікрито-спаритових вапняків перевищує в 3,6–6 разів цей параметр доломітизованих піщанистих вапняків, при практичній рівності його в насичених гасом породах (табл. 1).

Встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтами: пористості ($k_п$), ефективної пористості ($k_{п,еф}$), залишкового нафтонасичення ($k_{зн}$) і діелектричною проникністю (ε) для мікрито-спаритових і доломітизованих піщанистих вапняків, насичених гасом, які апроксимуються степеневою функцією.

Для мікрито-спаритових вапняків:

$$k_п = 0{,}22911 \cdot \varepsilon^{-0{,}33476},$$

при $R^2$ = 0,715 – залежність $k_п$=f(ε),

$$k_{п,еф} = 0{,}2488 \cdot \varepsilon^{-1{,}132},$$

при $R^2$ = 0,809 – залежність $k_{п.еф}$=f(ε),

$$k_{зн} = 0{,}36765 \cdot \varepsilon^{0{,}37413},$$

при $R^2$ = 0,719 – залежність $k_{зн}$=f(ε).

Для доломітизованих піщанистих вапняків:

$$k_п = 0{,}40589 \cdot \varepsilon^{-0{,}88037},$$

при $R^2$ = 0,751 – залежність $k_п$=f(ε),

$$k_{п,еф} = 3{,}70798 \cdot \varepsilon^{-3{,}52258},$$

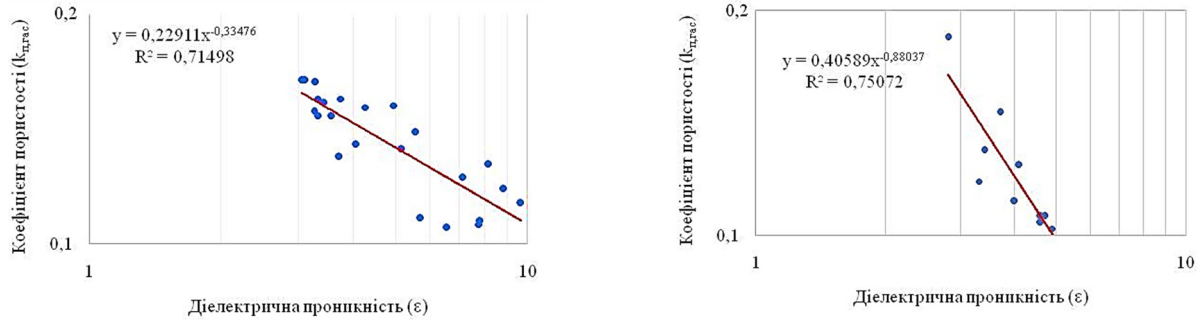
при $R^2$ = 0,922 – залежність $k_{п.еф}$=f(ε),

$$k_{зн} == 0{,}11316 \cdot \varepsilon^{1{,}33163},$$

при $R^2$ = 0,796 – залежність $k_{зн}$=f(ε).

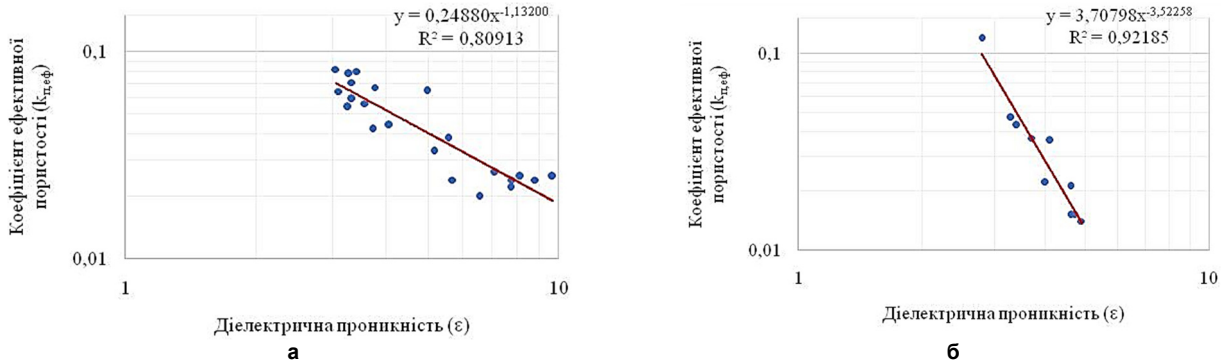
Графіки цих залежностей наведено на рис. 3–5.

***Фізичне моделювання пластових умов.*** Виконано комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000М з метою визначення питомого та відносного електричного опорів порід у пластових умовах ($p_{еф}$=30 МПа, t=50°C; М=190 г/л). Вимірювання виконувались на зразках, насичених моделлю пластової води (розчином NaCl). Фізичне моделювання пластових умов проведено на 8 зразках доломітизованих піщанистих вапняків. Межі змін і середні значення питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах наведено в табл. 2.



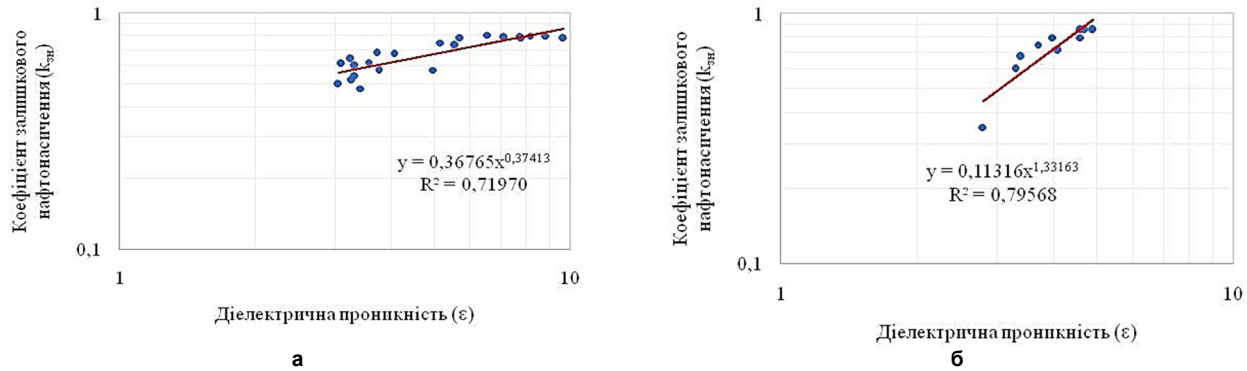

а б

**Рис. 3. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_п$) та діелектричною проникністю (ε):**
а) мікрито-спаритові вапняки; б) доломітизовані піщанисті вапняки




а б

**Рис. 4. Кореляційна залежність між коефіцієнтом ефективної пористості ($k_{п,еф}$) та діелектричною проникністю (ε):**
а) мікрито-спаритові вапняки; б) доломітизовані піщанисті вапняки




а б

**Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом залишкового водонасичення ($k_{зн}$) та діелектричною проникністю (ε):** а) мікрито-спаритові вапняки; б) доломітизовані піщанисті вапняки

*Таблиця 2*

**Межі змін і середні значення електричних параметрів доломітизованих піщанистих вапняків у пластових умовах**

| № | Порода | Значення параметра | Питомий електричний опір, $\rho_{пл}$, Ом·м | Відносний електричний опір, P |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Доломітизовані піщанисті вапняки | min | 0,81 | 17,3 |
| 2 | | max | 1,48 | 31,6 |
| 3 | | середнє | 1,10 | 23,6 |

Зростання питомого електричного опору із збільшенням тиску від атмосферного до пластового пояснюється закриттям мікротріщин у породах та деформацією в них пустотного простору. Однак у разі збільшення температури від атмосферної до пластової, опір порід зменшується. Отже, маємо суперпозицію впливу двох різнонаправлених факторів на питомий електричний опір порід у пластових умовах.

При фізичному моделюванні встановлено, що питомий електричний опір досліджених вапняків у пластових умовах змінюється від 0,81 до 1,48 Ом·м за середнього значення 1,1 Ом·м. Відносний електричний опір вапняків у пластових умовах змінюється від 17,3 до 31,6 за середнього значення 23,6 (табл. 2).

За результатами комплексного аналізу даних лабораторних електрометричних вимірювань встановлено кореляційні залежності між питомим електричним опором в атмосферних ($\rho$) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах (рис. 6), між відносним електричним опором (параметром пористості) в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах (рис. 7) та між відносним електричним опором ($P_{пл}$) і коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) у пластових умовах (рис. 8).

Аналітичні вирази кореляційних залежностей, графіки яких зображено на рис. 6–8, наведено нижче:

$$\rho_{пл} = 0{,}8501 \cdot \rho - 0{,}2108, \text{ при } R^2=0{,}946;$$

$$P_{пл} = 1{,}4877 \cdot P - 4{,}5068, \text{ при } R^2=0{,}946;$$

$$P_{пл} = 1{,}689 \cdot k_{п,пл}^{-1{,}289}, \text{ при } R^2=0{,}6.$$

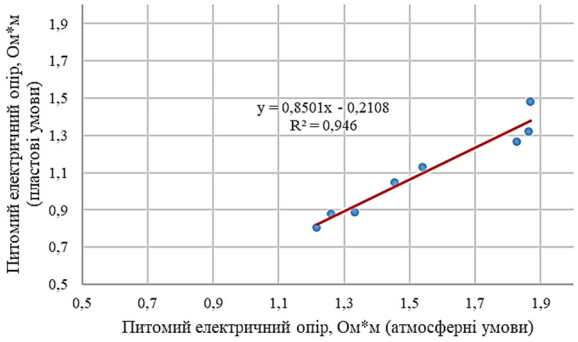



**Рис. 6. Кореляційні залежності між питомим електричним опором порід в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах. Доломітизовані піщанисті вапняки**

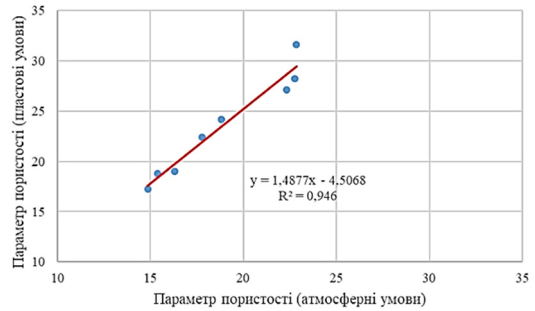



**Рис. 7. Кореляційні залежності між параметром пористості (відносним електричним опором) порід в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах. Доломітизовані піщанисті вапняки**

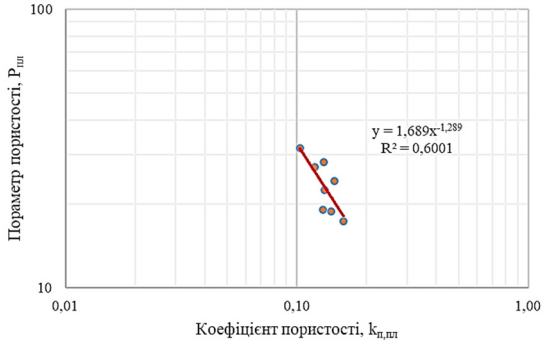



**Рис. 8. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості ($k_{п.пл}$) й параметром пористості (відносним електричним опором, $P_{пл}$) порід в пластових умовах. Доломітизовані піщанисті вапняки**

Кореляційні залежності між питомими та відносними електричними опорами в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійною функцією (рис. 6–7), а між відносним електричним опором і коефіцієнтом пористості – степеневою функцією (рис. 8).

Встановлені кореляційні залежності, графіки яких наведено на рис. 6–8 та їх аналітичні вирази, дають змогу оцінювати електричні параметри порід, що перебувають у пластових умовах, за результатами їх лабораторного визначення в атмосферних умовах.

ISSN 1728-3817

**Дискусія і висновки**

Лабораторні дослідження петрофізичних властивостей вапняків є актуальними щодо оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ. У статті висвітлено результати лабораторних досліджень електричних властивостей карбонатних порід верхнього карбону Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища Глинсько-Солохівського ГКР в інтервалі глибин 1760–1900 м. Досліджені породи представлені мікрито-спаритовими та доломітизованими піщанистими вапняками.

Лабораторними електрометричними вимірюваннями встановлено, що питомий електричний опір мінерального скелета (опір сухих екстрагованих вапняків) змінюється: для мікрито-спаритових вапняків – від 14,826 до 358,639 kОм·м (середнє 62,713 kОм·м); доломітизованих піщанистих вапняків – 111,953 kОм·м до 12,147 МОм·м (середнє 1,542 МОм·м). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової рідини, змінюється. Зразки доломітизованих піщанистих вапняків, насичені моделлю пластової води, мають ПЕО від 1,11 до 2,65 Ом·м (середнє 1,7 Ом·м). Знижений електричний опір мікрито-спаритових вапняків порівняно з опором доломітизованих піщанистих вапняків пояснюється підвищеним вмістом рудних мінералів (сульфідів) у перших.

В результаті петрофізичних досліджень визначено відносний електричний опір доломітизованих піщанистих вапняків в атмосферних умовах, який змінюється від 13,5 до 32,3 (середнє 20,7). На основі цих даних встановлено кореляційно залежність між коефіцієнтом пористості і відносним електричним опором досліджених порід, що апроксимується степеневою функцією.

Електрометричні дослідження при центрифугуванні зразків доломітизованих піщанистих вапняків дали змогу встановити кореляційний зв'язок між параметром збільшення електричного опору і коефіцієнтом водонасичення, який виражається степеневою функцією.

Встановлено, що відносна діелектрична проникність мінерального скелета порід змінюється: для мікрито-спаритових вапняків – від 10,8 до 41,8 (середнє 25,9); для доломітизованих піщанистих вапняків – від 3 до 7,5 (середнє 4,2). Мікрито-спаритові вапняки, насичені гасом, мають ДП від 3,1 до 9,7 (середнє 5,2), а доломітизовані піщанисті вапняки характеризуються значеннями ДП від 2,8 до 4,9 (середнє 3,8). Доломітизовані піщанисті вапняки, насичені моделлю пластової води, мають ДП від 566 до 9565 (середнє 3898). Відзначається, що діелектрична проникність скелета (сухий стан) мікрито-спаритових вапняків перевищує в 3,6–6 разів цей параметр доломітизованих піщанистих вапняків, за практичної рівності його в насичених гасом породах, що пояснюється підвищеним вмістом рудних мінералів (сульфідів) у мікрито-спаритових вапняках.

Встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтами: пористості, ефективної пористості, залишкового нафтонасичення і відносною діелектричною проникністю мікрито-спаритових і доломітизованих піщанистих вапняків, насичених гасом, які апроксимуються степеневою функцією.

В результаті фізичного моделювання пластових умов встановлено, що питомий електричний опір доломітизованих піщанистих вапняків змінюється від 0,81 до 1,48 Ом·м (середнє 1,1 Ом·м). Вимірювання питомого опору порід при різних тисках показали, що внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску, водночас залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору від тиску для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку. Однак збільшення температури в пластових умовах призводить до зворотного процесу – опір зменшується. Тобто маємо суперпозицію впливу двох різнонаправлених факторів на питомий електричний опір порід у пластових умовах. Дослідженнями відносного електричного опору доломітизованих піщанистих вапняків у пластових умовах установлено, що цей параметр змінюється від 17,3 до 31,6 (середнє 23,6).

Завдяки комплексному аналізу матеріалів електрометричних досліджень для порід установлено кореляційні зв'язки між питомим електричним і відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах, а також між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором у пластових умовах. Залежність між питомим та відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією, а між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором – степеневою. Фізичне моделювання пластових умов дає змогу адаптувати значення електричних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.

Кореляційні залежності електричних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями вапняків, отримані за результатами виконаних лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин порід верхнього карбону Гнідинцівського нафтогазоконденсатного родовища та суміжних площ.

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

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

**Джерела фінансування.** Роботу виконано в рамках держбюджетної теми №24БП049-01.

**Список використаних джерел**

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2019). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(85), 37–45. https://doi.org/10.17721/1728-2713.85.05

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2020b). Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(89), 49–58. https://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., Шабатура, О. В., & Олійник, О. В. (2020a). 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. https://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04

Вижва, С. А., Онищук, В. І., Орлюк, М. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2021). Електричні і пружні параметри ущільнених теригенних порід карбону східної частини північної прибортової зони ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(95), 25-33. https://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03

Дахнов, В. Н. (1975). *Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород*. Недра.

Карпенко, О. М., Михайлов, В. А., & Карпенко, І. О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(68), 49–54. https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.09.49-54

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/10.17721/1728-2713.66.12

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

Михайлов, В. А., Вижва, С. А., & Загнітко, В. М. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Книга IV*. ВПЦ "Київський університет". http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/mono_USHU/4-1_Eastern_Region.pdf

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

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. *Геофізичний 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. *Геофізичний журнал*, 36(1), 64–80.

Садівник, М. І., Федоришин, Д. Д., Трубенко, С. Д., & Федоришин, С. Д. (2013). Вплив пластового тиску на електричні параметри гірських порід. У *XII Міжнародна конференція "Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти"*. Київ, Україна.

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. https://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09

Старостенко, В. И., & Русаков, О. М. (2015). *Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины*. Галактика.

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

Orlyuk, M. I., Drukarenko, V. V., Onyshchuk, I. I., & Solodkyi, I. V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhivs'kiy oil-and-gas region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2(25), 77–88. https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071

Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties* (4th ed.). Elsevier.

Vyzhva, S. A., Onyshchuk, V. I., & Onyshchuk, D. I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *Nafta-Gaz*, LXXIII(2), 90–96. https://doi.org/10.18668/NG.2017.02.03

**References**

Dakhnov, V. N. (1975). *Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks*. Nedra [in Russian].

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/10.17721/1728-2713.66.12

Karpenko, O., Mykhailov, V., & Karpenko, I. (2015). Eastern Dnieper-Donets depression: Predicting and developing hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(68), 49–54 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.09.49-54

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. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV*. Kyiv University Press [in Ukrainian]. http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/mono_USHU/4-1_Eastern_Region.pdf

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., & Pashkevich, I. K. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinskaya group of gas fields as an integral part of complex search criteria for hydrocarbons. *Geophysical Journal*, 33(6), 136–151 [in Russian]. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799

Orlyuk, M. I., Drukarenko, V. V., Onyshchuk, I. I., & Solodkyi, I. V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhivs'kiy oil-and-gas region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 2(25), 77–88. https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071

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].

Sadivnik, M., Fedoryshyn, D., Trubenko, O., & Fedoryshyn, S. (2013). Influence of Formation Pressure on the Electrical Characteristics of Rocks. In *12th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].

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

Starostenko, V. I., & Rusakov, O. M. (2015). *Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donetsk depression*. Galaktika [in Russian].

Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2015). *Petrophysics. Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties* (4th ed.). Elsevier.

Vyzhva, S. A., Onyshchuk, V. I., & Onyshchuk, D. I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *Nafta-Gaz*, LXXIII(2), 90–96. http://doi.org/10.18668/NG.2017.02.03

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliinyk, O., Reva, M., & Shabatura, O. (2020a). 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., Reva, M., & Shabatura, O. (2020b). Electrical and acoustic parameters of lower permian carbonate rocks (western part of the Hlynsko-Solokhivskyi of gas-oil-bearing district of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(89), 49–58 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2019). Electrical parameters of the upper carbon rocks (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(85), 37-45 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.85.05

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Orlyuk, M., Onyshchuk, I., Reva, M., & Shabatura, O. (2021). Electric and elastic parameters of carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(95), 25-33 [in Ukrainian]. http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03

**Отримано редакцією журналу / Received: 15.07.25**
**Прорецензовано / Revised: 23.09.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Serhii VYZHVA**[1], **Dr. Sci. (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 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.**
**e-mail: mvreva@gmail.com**

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

[1]**Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine**

## ELECTRIC PROPERTIES OF CARBON ROCKS OF THE HNIDYNTSIVSKE OIL AND GAS CONDENSATE DEPOSIT OF THE GLYNSKO-SOLOKHIV GAS CONDENSATE FIELD

**Background.** ***The paper focus is on the results of electric properties determination of upper carbon rocks of the Hnidyntsivske oil and gas condensate deposit of the Glynsko-Solokhiv gas condensate field. The main aim of the research is comprehensive analysis of rock samples physical features.***

**Methods.** ***A petrographic description of limestones at the first stage was made. Then, resistivity of samples and their relative permittivity were determined. To determine these parameters, a laboratory electrometric installation that consist of the RLC-meter MHC-1100 and the special core holder was used.***

**Results.** ***Electric features of rock samples such as resistivity, formation resistivity factor, relative permittivity were researched. The limits of variation and mean values of the electric properties of the studied rocks are given.***

**Conclusions.** ***The correlation analysis was utilized to create some correlations between the reservoir parameters of the studied rocks and their electric properties measured in atmospheric and reservoir conditions. These correlation relationships could help in the interpretation of well logging data and modeling of reservoir parameters of carbonate reservoir rocks.***

**Keywords**: ***limestones, resistivity, formation resistivity factor, relative permittivity, correlation relationships.***

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

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

УДК 550.3:550.8
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.03

**Роман ПЕТРОКУШИН**[1], **асп.**
**ORCID ID: 0000-0001-7639-8279**
**e-mail: petrokushin@gmail.com**

**Дмитро БЕЗРОДНИЙ**[1], **доц.**
**ORCID ID: 0000-0001-7463-7133**
**e-mail: dmytrobezrodnyi@knu.ua**

**Джузеппе БАНКАЛА**[2], **ст. геофізик**
**ORCID ID: 0000-0003-1843-1610**
**e-mail: GBancala@slb.com**

**Лучіана ДЕ ЛУКА**[2], **пров. геофізик**
**ORCID ID: 0000-0001-7717-1893**
**e-mail: LLuca@slb.com**

[1]**Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна**
[2]**СЛБ (Schlumberger), Сан-Донато-Міланезе, Італія**

# ВИЯВЛЕННЯ ГРАНИЦЬ ГЕОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ АНАЛІЗУ ВІДНОШЕННЯ ПОХІДНИХ ГРАВІТАЦІЙНОГО ПОЛЯ НА ПРИКЛАДІ ПЕРЕДКАРПАТСЬКОГО ПРОГИНУ

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України Михайлом ОРЛЮКОМ*)

**В с т у п .** ***Представлено методологію та результати її застосування для визначення границь об'єктів на основі аналізу гравітаційних (маються на увазі аномалії Буге $\Delta g_{Буге}$) даних. Основну увагу приділено виділенню вертикальних границь різномасштабних структур, які можуть ідентифікуватися як геологічні лінеаменти, такі як розломи та зони підвищеної тріщинуватості, що мають важливе значення для розуміння структурно-тектонічної будови та оцінки геотермального потенціалу території. Передкарпатський прогин обрано як об'єкт дослідження через його складну тектонічну будову та перспективність у пошуках геотермальних і вуглеводневих ресурсів.***

**М е т о д и .** ***Для аналізу геологічних структур використано метод нахилу похідної гравітаційного поля (Tilt Derivative) у поєднанні зі спектральним аналізом та трансформацією Фур'є. Методологія включає кілька етапів: обчислення градієнта гравітаційного поля, згладжування, інгібування немаксимальних значень та порогування контурів. Такий підхід дає змогу з високою точністю визначати межі геологічних об'єктів і виділяти розриви функції гравітаційного потенціалу. Аналіз даних проведено на основі результатів гравітаційної зйомки в межах Передкарпатського прогину.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***Застосування методики дало змогу виділити лінеаменти регіонального та локального типів, які відповідають розломам і зонам підвищеної тріщинуватості. Виділені зони можуть слугувати шляхами міграції геотермальних вод із глибоких нагрітих зон до порід-колекторів, що підвищує їхню перспективність для геологорозвідувальних робіт. Порівняльний аналіз отриманих результатів з існуючими геологічними картами підтвердив високу точність методу. Крім того, виявлено додаткові структури, які раніше не були помічені, що свідчить про ефективність застосованої методології.***

**В и с н о в к и .** ***Запропонована методика є ефективним експрес-методом виділення розломно-блокових структур на основі гравіметричних даних. Її застосування дає змогу уточнювати структурно-тектонічну будову регіонів, виділяти нові розломи та зони підвищеної тріщинуватості, що важливо для пошуків геотермальних і вуглеводневих ресурсів. Методологія має широкий потенціал для використання в дослідженнях складних геологічних об'єктів, таких як Передкарпатський прогин, і може суттєво підвищити ефективність геологорозвідувальних робіт.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***Передкарпатський прогин, метод визначення границь об'єктів, гравітаційні аномалії, спектральний аналіз, геотермальні пошуки.***

## Вступ

Передкарпатський прогин є важливим геологічним регіоном, що характеризується складною тектонічною будовою і значним потенціалом для геотермальної розвідки. Визначення розломів і зон підвищеної тріщинуватості є ключовим аспектом для розуміння перспективності басейну та локації зон підвищеної імовірності геотермального потенціалу. Наявні дослідження зон підвищеної тріщинуватості та аналізу розломів є обмеженими до зони інтересу нафтогазової геології. Проте для аналізу тектоніки в геотермальній розвідці необхідне розуміння глибинності та протяжності розломів. Методи визначення границь об'єктів на основі даних гравітаційної зйомки дають змогу отримати детальну інформацію про геологічну структуру, що може бути використано для подальших геотермальних досліджень.

***Актуальність дослідження.*** Останні дослідження демонструють зростаючу необхідність в ефективних методах інтерпретації даних потенціальних полів для виявлення геологічних розломів. За відсутності сейсмічних даних і дослідження свердловин методи гравітаційної зйомки дають найкраще розуміння тектоніки регіону. Сучасні методи, такі як Tilt Derivative (нахил похідної гравітаційного поля, далі – TDR), дають змогу отримати більш точну інформацію про глибину та орієнтацію розломів, що критично важливо для геотермальних пошуків. Актуальність цього дослідження полягає в можливості поліпшення методів інтерпретації даних потенціальних полів та використання їх для оптимізації геологічної розвідки в Передкарпатському прогині.

Метою цього дослідження є розробка і застосування методів визначення границь об'єктів для інтерпретації порушень різної глибини в Передкарпатському прогині на основі даних гравітаційної зйомки.

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** Використання методу визначення границь об'єктів є доволі популярним способом ідентифікації розривів функції, які інтерпретуються як наявність тріщин або розломів

© Петрокушин Роман, Безродний Дмитро, Банкала Джузеппе, Де Лука Лучіана, 2025

ISSN 1728-3817

на основі геофізичних даних. Цей метод має ключову роль у визначенні тектонічних порушень на основі сейсмічних даних.

Перші застосування методу визначення границь об'єктів були вкрай простим і ефективним методом, який давав хороші результати, що підкреслювали існуючі розриви у сейсмічному об'ємі (Luo et al., 1996). Функціонал перших методів визначення границь об'єктів мав за основу операцію просторового диференціювання першого порядку, у якій дані згорталися із простим дво- або триточковим фільтром. Сучасні ж методи визначення границь об'єктів (Koson et al., 2014; Silva et al., 2005) дають змогу виявити не лише регіональні розломи, а і тріщинуватість та наявність геологічних тіл, у зв'язку із застосуванням трансформації Фур'є та спектрального аналізу потенціальних полів.

Застосування методу визначення границь об'єктів в інтерпретації результатів геофізичних вимірювань потенціальних полів дає змогу виявляти інформацію, яка не очевидна в оригінальних даних і відіграє важливу роль у різних масштабах тектонічної інтерпретації, таких як мінеральна або нафтовидобувна розвідка (Yan et al., 2015), ідентифікація розломів (Ghosh, 2019), визначення меж різних тектонічних утворень або геологічних тіл (Guy et al., 2014).

***Структурно-тектонічні умови об'єкта дослідження***. Передкарпатський прогин є частиною Карпатської нафтогазоносної провінції, яка характеризується складною багатоярусною структурою земної кори. Прогин розташований між Східноєвропейською платформою та складчастими зонами Карпат і утворює передовий край орогену. У його межах виділяють три основні тектонічні зони: Більче-Волицьку (Зовнішню), Самбірську та Бориславсько-Покутську (Внутрішню). Ці зони відрізняються за складом осадових товщ, тектонічною будовою та історією формування (Кутас, 2021).

Прогин перетинають численні розломи поздовжнього і поперечного простягання, які відіграють ключову роль у формуванні структурно-тектонічних пасток як для нафти та газу, так і потенційних геотермальних родовищ. Поздовжні розломи зумовлені насувними процесами, тоді як поперечні розломи поділяють прогин на блоки з різними умовами дислокації (Атлас родовищ…, 1998). Ці зони підвищеної тріщинуватості є важливими каналами для міграції флюїдів та формування покладів вуглеводнів і геотермальних ресурсів.

Незважаючи на те, що Передкарпатський прогин не є насамперед басейном геотермального потенціалу, його перспективи були описані в попередніх роботах (Куровець та ін., 2014) та підтверджені новими даними буріння свердловин, які відкривали поклади з температурами 120–150 градусів в межах Більче-Волицької зони на глибинах до 3 км.

Глибинна будова прогину також відображає багатофазний розвиток регіону. Докембрійський фундамент поступово занурюється під Складчасті Карпати, а мезозойські та кайнозойські осадові комплекси характеризуються значною товщиною, яка досягає 10 км у центральній частині прогину (Крупський, 2001). У таких умовах використання сучасних методів, зокрема TDR, є важливим інструментом для деталізації структурно-тектонічної будови регіону та виділення перспективних зон для геологорозвідувальних робіт.

**Методи**

В цій роботі показано застосування методу TDR, який є методом дослідження кута нахилу похідних гравітаційного поля для визначення границь об'єктів на території Передкарпатського прогину.

Для ідентифікації розломів різних типів, а також виділення зон тріщинуватостей застосовують різні типи методів визначень границь об'єктів. Для прикладу, в сейсмічній інтерпретації використовуються Гаусівські функції, фільтр Канни, оператор центрованої різниці. Кожен з них має своє застосування та обмеження.

При інтерпретації гравітаційних аномалій проведено застосування методу кута нахилу похідних гравітаційного поля. Основою функції є порівняння між вертикальною та горизонтальною похідними функції гравітаційного поля. Метод фільтру дає змогу зробити ідентифікацію розривів функції (що, у свою чергу, може вказувати на наявність тріщин або ж розломів) (Akın et al., 2011; Stewart, & Miller, 2018). Метод широко використовується як експрес метод оцінки гравітаційної аномалії та показав своє застосування у світовій практиці (Cooper, & Cowan, 2006; Mogahed et al., 2017; Salem et al., 2008). Математично цю операцію можна описати як

$$TDR = tan^{-1}\frac{\frac{\partial g}{\partial z}}{\sqrt{(\frac{\partial g}{\partial x})^2+(\frac{\partial g}{\partial y})^2}}, \quad (1)$$

де $g(x,y,z)$ – дані гравітаційного поля; $\frac{\partial g}{\partial z}$ – вертикальна похідна гравітаційного поля; $\frac{\partial g}{\partial x}$ і $\frac{\partial g}{\partial y}$ – повний горизонтальний градієнт гравітаційного поля.

Проте у зв'язку зі складною геологією Передкарпатського прогину, а також фокусуванні робіт у межах колекторів порід басейну (глибина від 3 до 6 км), зазначений метод застосовували на ймовірно розрахованих середніх глибинах. Після трансформації Фур'є та спектрального аналізу вибрано вікно довжини хвилі 11–35 км.

***Запропонований авторами алгоритм*** проведеного дослідження при застосуванні методів визначення границь об'єктів полягає в таких кроках:

1. Завантаження даних зйомки.
2. Вибір методу інтерполяції даних для побудови поверхні.
3. Використання супутникових знімків для визначення топографії.
4. Трансформація Фур'є та спектральний аналіз для виділення корисного сигналу.
5. Розрахунок параметрів визначення границь об'єктів методом TDR.
6. Інтерпретація даних та виділення розломів/зон підвищеної тріщинуватості.

*Завантаження даних зйомки*. Для виконання даної операції було використано програмне забезпечення (ПЗ) Petrel, що дає змогу проводити базову обробку та інтерпретацію потенціальних полів. Дані, що були використані, являють собою збір листів масштабу 1:200 000 гравітаційної зйомки, розташованих у межах Передкарпатського прогину (рис. 1).

*Вибір методу інтерполяції даних для побудови карти гравітаційного поля.* У зв'язку з роздільною здатністю точок зйомки (з відстанню 1 км×1 км) вибрано метод збіжної інтерполяції (Convergent interpolation) (рис. 2).

Це метод інтерполяції, який забезпечує збіжність до точних значень функції при збільшенні кількості точок даних або вузлів інтерполяції з кроком дискретизації, що відповідає кроку зйомки.

*Використання супутникових знімків для визначення топографії.* Для правильних розрахунків та інтерпретації даних потенціальних полів обов'язкове врахування топографії. Дані були отримані з відкритих джерел (ASTER NASA) з роздільною здатністю 30 м та завантажені в ПЗ Petrel.

*Трансформація Фур'є та спектральний аналіз для виділення корисного сигналу.* У цій статті трансформація Фур'є та спектральний аналіз застосовуються для виділення корисного сигналу з даних гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину (рис. 3). Ці методи дають змогу виявити домінуючі частотні компоненти, усунути небажані шуми та поліпшити точність визначення геологічних лінеаментів, таких як розломи та тріщинуватість.

*Розрахунок параметрів визначення границь об'єктів методом TDR.* Розрахунок параметрів визначення границь об'єктів методом TDR застосовується для точного виявлення геологічних розломів у даних гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину (рис. 4). Цей метод обчислює відношення вертикальної похідної до горизонтальної. Завдяки цьому вдається виділити розломи та тріщини, які можуть бути неочевидними в початкових даних, і таким чином отримати детальну картину геологічної структури регіону.

*Інтерпретація даних та виділення лінеаментів.* Фінальним кроком роботи є виділення лінеаментів для подальшого вивчення розломно-блокової тектоніки та прогнозування зон тріщинуватості, а також протяжності та орієнтації розломів. Результати цього етапу інтерпретації даних гравіметрії після проведеного спектрального аналізу з вилученням сигналу в довжині хвилі 11–35 км представлено на рис. 4а (червоний колір – адміністративний кордон України).

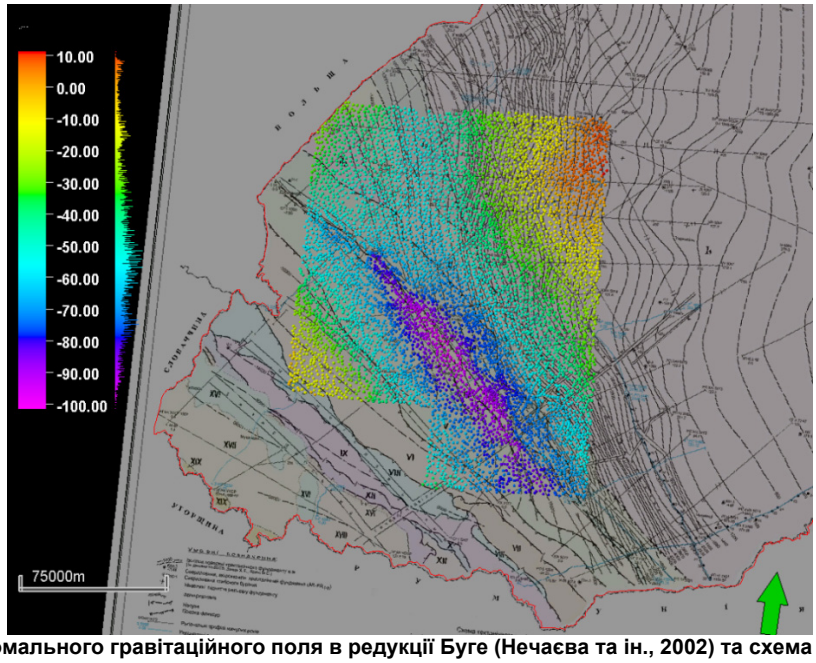



**Рис. 1. Карта аномального гравітаційного поля в редукції Буге (Нечаєва та ін., 2002) та схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей з основними розломами (Заяць, & Яриш, 1978)**

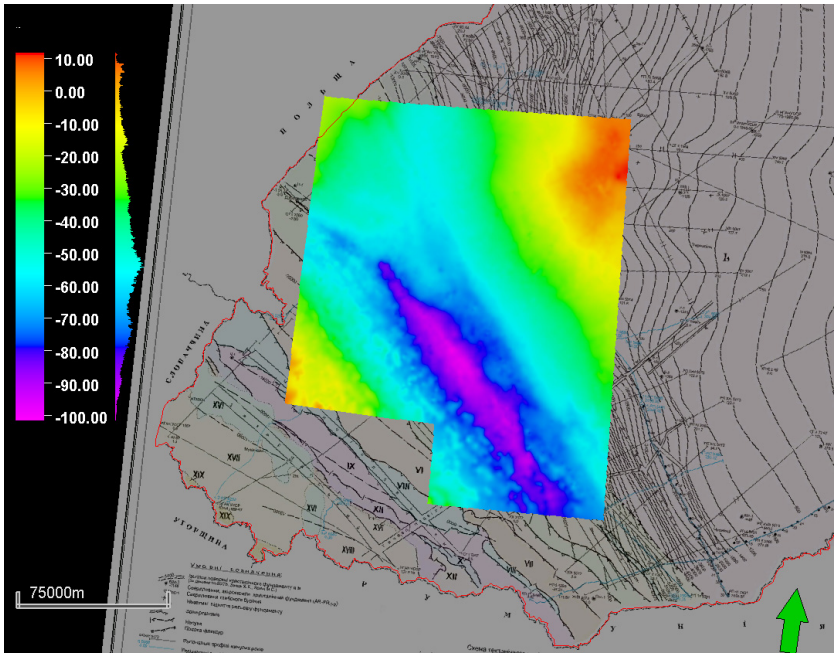



**Рис. 2. Інтерпольована карта аномального гравітаційного поля в редукції Буге методом збіжної інтерполяції та схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей з основними розломами (Заяць, & Яриш, 1978)**

ISSN 1728-3817

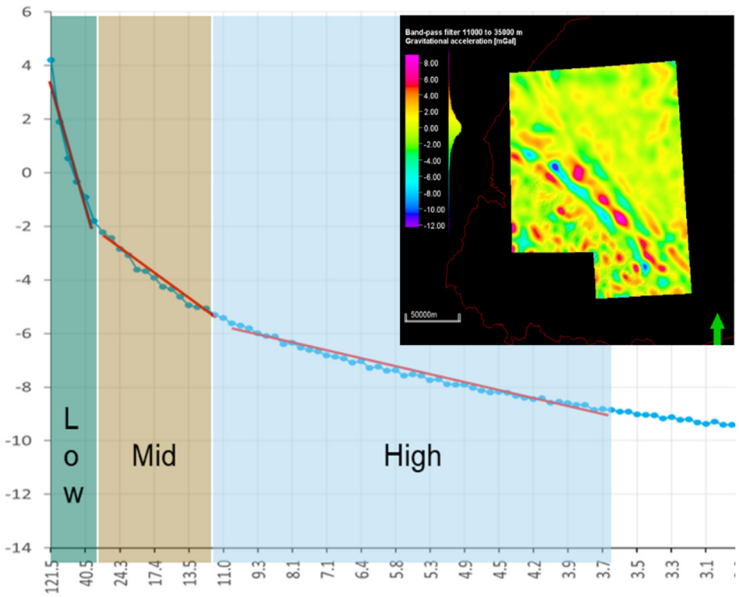
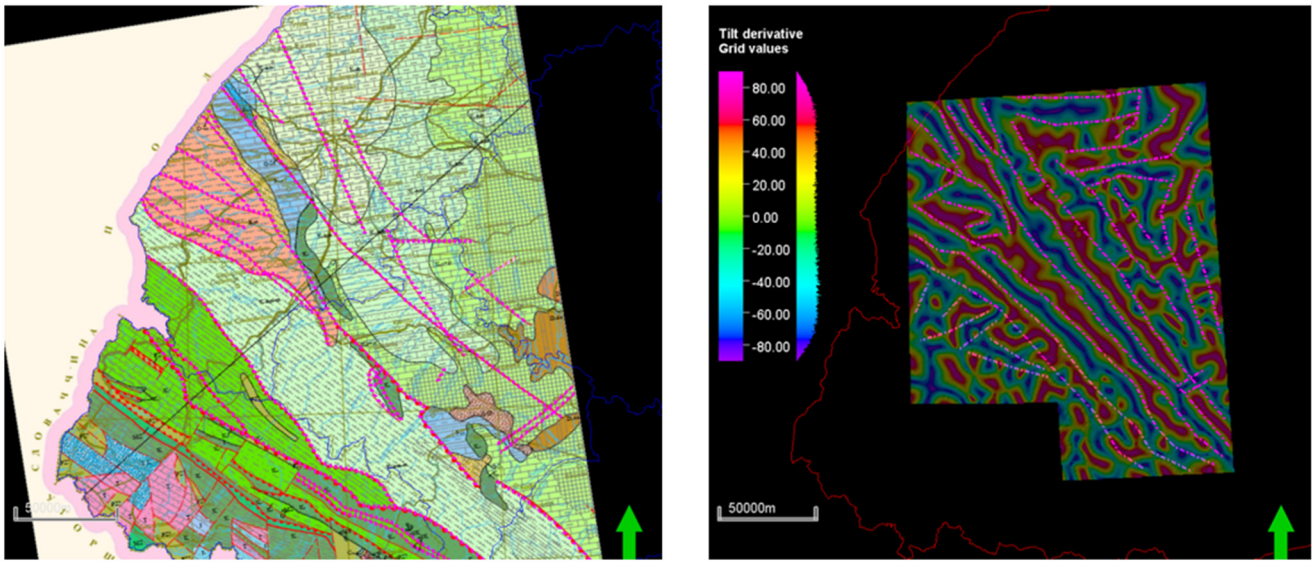



**Рис. 3. Спектральний аналіз частотного спектру гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину з виділенням частот (низька, середня, висока), а також вилучення частот середнього спектра (11–35 км довжини хвилі) з даних гравітаційного поля**

**Результати**

У ході дослідження успішно застосовано сучасні методи визначення границь об'єктів, зокрема метод TDR до результатів гравітаційної зйомки Передкарпатського прогину. Авторам вдалося виділити як регіональні, так і локальні розломи та тріщинуваті зони. Ці геологічні розломи, які є ідентифікаторами порушень геологічного середовища (наявність зон тріщин або ж розлому), можуть відігравати важливу роль у міграції геотермальних вод та виявленні зон підвищеної тріщинуватості.

За результатом проведеної роботи отримано нову інтерпретацію протяжності та орієнтації розломів, які простягаються на ймовірно розрахованих середніх глибинах порід-колекторів Передкарпатського прогину (3–6 км). За попередніми дослідженнями цього регіону (Гурський та ін., 2007) було отримано розу діаграм розломів. Автори провели порівняльний аналіз з результатами досліджень даної роботи, який показав орієнтацію на протяжність уже відомих розломів. Також матеріали інтерпретації за методом TDR дали змогу виділити додаткові розломи, які не були виявлені в попередніх дослідженнях (рис. 4, 5).




а б

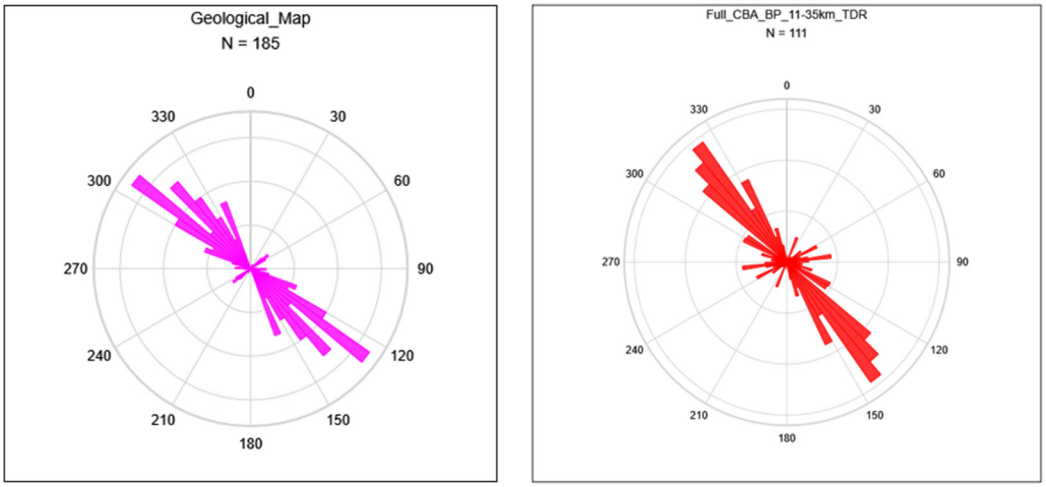
**Рис. 4. Порівняльна характеристика об'єкта досліджень:**
а – геологічна карта доміоценових відкладів Передкарпатського прогину (Гурський та ін., 2007);
б – приклад результатів виділення лінеаментів, що показують границі тектонічних структур різного масштабу

Порівняно з попередніми результатами отримано краще розуміння глибинності та орієнтації розломів Передкарпатського прогину. Метод TDR дав змогу виділити розломи, які не були ідентифіковані раніше, а також ті розломи, які можуть слугувати зоною міграції геотермальних флюїдів, що підтверджується даними буріння та

термометрії (рис. 7). Дані результати є невід'ємною частиною більш ґрунтовного аналізу геотермального потенціалу Передкарпатського прогину, оскільки дозволяють краще зрозуміти просторове розташування структурних елементів. Розуміння наявності лінеаментів та їх орієнтації дає змогу створити карту підвищеної імовірності розломних зон, що є основою для розрахунку геотермального потенціалу Передкарпатського прогину (рис. 7). Підтверджено локації лінеаментів та буріння свердловин з високим показником температури, що дозволяє зробити висновки про зв'язок даних лінеаментів та зон підвищеної імовірності геотермального потенціалу.

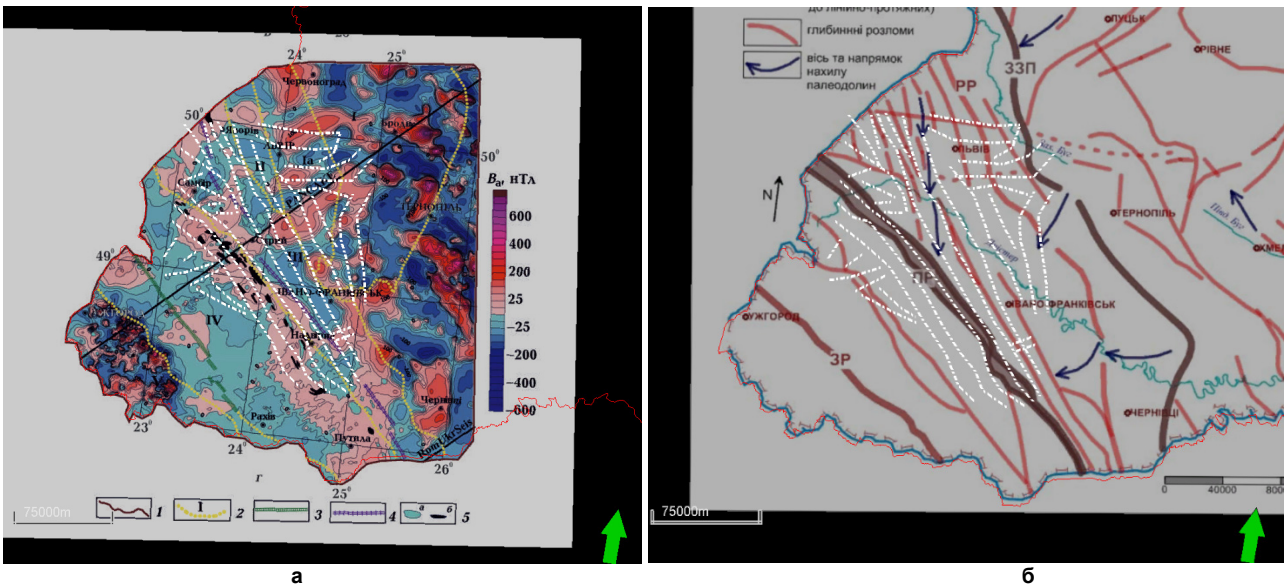
**Результати**

Результати дослідження роботи були також порівняні з іншими дослідженнями території Передкарпатського прогину на основі інтерпретації гравімагнітних даних. Проведено порівняльний аналіз схеми розломів та зон тріщинуватості цієї роботи з результатами інтерпретації магнітних аномалій шляхом осереднення вихідного поля (Орлюк та ін., 2022) (рис. 6а) та результатами аналізу карт трансформованого поля, отриманими за аномаліями Буге традиційними методами (Мончак, & Анікеєв, 2017) (рис. 6б). Проведений аналіз підтвердив застосування методу нахилу похідної гравітаційного поля, як експрес-методу аналізу гравітаційних даних. Зокрема показано збіг ряду виділених лінеаментів з поширенням смугових аномалій геомагнітного поля та нафтових родовищ (рис. 6а) та окремими розломами і розломними зонами, отриманими за гравімагнітними даними (рис. 6б). Підтвердження основних розломів з результатами попередніх досліджень демонструє достовірність цього методу, проте остаточне підтвердження виділених зон розломів та зон тріщинуватості необхідно аналізувати в комплексі з традиційними методами аналізу потенціальних полів, а також з результатами буріння та інших геофізичних досліджень.




а б

**Рис. 5. Результати побудови роза-діаграм інтерпретованих розломів відповідних карт:**
а – за даними Гурського та ін. (2007); б – за даними авторів




а б

**Рис. 6. Порівняльна характеристика об'єкта досліджень: виділені геологічні лінеаменти (білі пунктирні лінії) у зіставленні з (а) Картою локальної компоненти геомагнітного поля та поширення нафтових та газових родовищ вуглеводнів (Орлюк та ін., 2022) та (б) Схемою розломної тектоніки Західних областей України за гравімагнітними даними (Мончак, & Анікеєв, 2017)**

ISSN 1728-3817

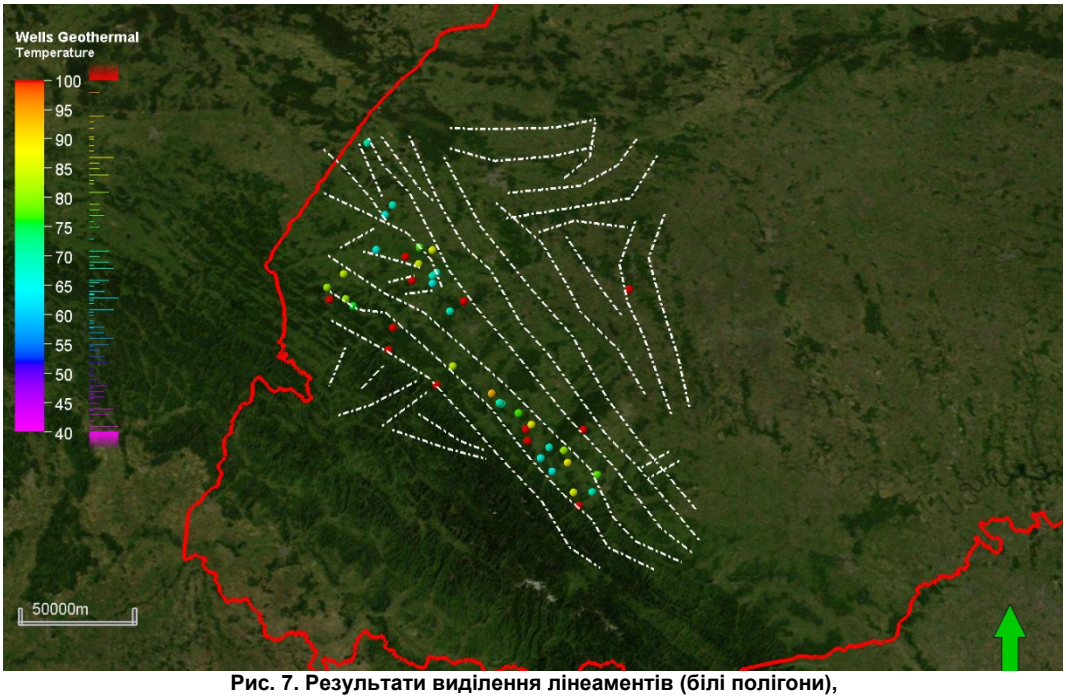



**Рис. 7. Результати виділення лінеаментів (білі полігони), які проявляються на зміні полярності поля методом TDR, а також дані вимірювання температури зі свердловин (кольорові точки) на фоні топографічної карти Передкарпатського прогину**

**Дискусія і висновки**

Робота сфокусована на ідентифікації розривів функції методом TDR з метою виділення лінеаментів, що можуть бути інтерпретовані як регіональні та локальні розриви. На території Передкарпатського прогину зазначений підхід також дає змогу розширити вивчення тектонічної історії, локалізації розломів та тріщинуватих зон для подальших робіт: геотермальних пошуків, мінералізації вод, пошуку критичних мінералів.

Таким чином, в цій роботі вперше застосовано інтеграцію методів спектрального аналізу та трансформації Фур'є з методом TDR для поліпшення точності визначення геологічних структур на основі даних гравітаційної зйомки. На відміну від попередніх досліджень, ця робота демонструє можливість виявлення додаткових розломів, які не були виділені раніше. Крім того, дослідження пропонує новий підхід до варіювання глибини порушень, що може бути використано для оптимізації геотермальної та мінеральної розвідки в складних геологічних умовах.

Зіставлення отриманих даних з існуючими геологічними картами підтвердило високу точність методів, а також виявило додаткові структури, які не були помічені у попередніх дослідженнях.

Перспективами застосування даного методу на території Передкарпатського прогину є деталізація тектоніки регіону, яка може бути застосована для виявлення вуглеводневих покладів, геотермальних пошуків, мінеральної розвідки чи пошуку критичних мінералів, де глибинні розломи відіграють ключову роль.

**Джерела фінансування.** Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

**Список використаних джерел**

Атлас родовищ нафти і газу України. В шести томах. Т. 4, 5. (1998). *Західний нафтогазоносний регіон*. УНГА.

Гурський, Д. С., Колосовська, В. А., Калінін, В. І., та ін. (2007). *Геологічна карта докайнозойських відкладів України м-б: 1:1000000*. Геологічна служба України.

Заяць, Х., & Яриш, М. (1978). *Схема будови поверхні дорифейського кристалічного фундаменту західних областей з основними розломами*. ЛВ УкрДГРІ.

Крупський, Ю. З. (2001). *Геодинамічні умови формування і нафтогазоносності Карпатського та Волино-Подільського регіонів України*. УкрДГРІ.

Куровець, І. М., Сеньковський, І. М., Михайлов, В. А., Дригант, Д. М., Крупський, Ю. З., Гладун, В. В., Чепіль, П. М., Гулій, В. М., Куровець, С. С., Шлапінський, В. С., Шлапінський, Ю. В., Колтун, Ю. В., Чепіль, В. П., & Бодлак, В. П. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України* (Кн. II). Ніка-Центр.

Кутас, Р. І. (2021). Глибинна дегазація і нафтогазоносність Східних (Українських) Карпат: геодинамічний і геотермічний аспекти. *Геофизический журнал*, 43(6).

Мончак, Л., & Анікеєв, С. (2017). Відображення тектонічної будови західного регіону України у гравімагнітних полях. Геодинаміка, 2(23).

Нечаєва, Т. С., Шимків, Л. М., Єнтін, В. А., Дроздецький, В. В., Нікіташ, Л. П., & Дробах, С. М. (2002). *Схема гравітаційного поля України. М-б. 1:200000*. ПДРГП "Північгеологія".

Орлюк, М. І., Бакаржієва, М. І., & Марченко, А. В. (2022). Магнітна характеристика і тектонічна будова земної кори Карпатської нафтогазоносної області як складова частина комплексних критеріїв вуглеводнів. *Геофізичний журнал*, 44(5), 77–105.

Akın, U., Şerifoğlu, B., & Duru, M. (2011). The use of tilt angle in gravity and magnetic methods. *Mineral Res. Expl. Bull.*, 143, 1–12.

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585–1591.

Ghosh, G. K. (2019). Interpretation of gravity anomaly to delineate thrust fault's locations at the northeastern part of India and its adjacent areas using source edge detection technique, tilt derivative and Cos(theta) analysis. *Acta Geophysica*, 67, 1277–1295.

Guy, A., Schulmann, K., Munschy, M., Miehe, J., Edel, J., Lexa, O., & Fairhead, D. (2014). Geophysical constraints for terrane boundaries in southern Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 7966–7991.

Stewart, I. C. F., & Miller, D. T. (2018). Directional tilt derivatives to enhance structural trends in aeromagnetic grids. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 514–523.

Koson, J., Sriboon, P., Suteerasak, T., & Charoenruk, T. (2014). Seismic attributes and seismic geomorphology. *Engineering Journal*, 6(1), 1–9.

Luo, Y., Higgs, W. G., & Kowalik, W. S. (1996). Edge detection and stratigraphic analysis using 3D seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Mogahed, M. M., Abd El-Aziz, M. M., & El-Gohary, A. M. (2017). Application of tilt derivative to gravity and magnetic data in the delineation of structural features. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(2), 350–360.

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., & Smith, R. (2008). Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1), L1–L10.

Silva, C., Marcolino, C., & Lima, F. (2005). Automatic Fault Extraction Using Ant Tracking Algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Yan, J. Y., Lv, Q. T., Chen, M. C., et al. (2015). Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58, 4450–4464.

**References**

Akın, U., Şerifoğlu, B., & Duru, M. (2011). The use of tilt angle in gravity and magnetic methods. *Mineral Res. Expl. Bull*., 143, 1–12.

Atlas of Oil and Gas Fields of Ukraine. In six volumes. Vol. 4, 5. (1998). *Western Oil and Gas-Bearing Region*. UNGA [in Ukrainian].

Cooper, G. R. J., & Cowan, D. R. (2006). Enhancing potential field data using filters based on the local phase. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1585–1591.

Ghosh, G. K. (2019). Interpretation of gravity anomaly to delineate thrust faults locations at the northeastern part of India and its adjacent areas using source edge detection technique, tilt derivative and Cos(theta) analysis. *Acta Geophysica*, 67, 1277–1295.

Guy, A., Schulmann, K., Munschy, M., Miehe, J., Edel, J., Lexa, O., & Fairhead, D. (2014). Geophysical constraints for terrane boundaries in southern Mongolia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 7966–7991.

Hurskyi, D. S., Kolosovska, V. A., Kalinin, V. I., et al. (2007). *Geological map of pre-Cenozoic deposits of Ukraine (Scale 1:1,000,000)*. Geological Survey of Ukraine [in Ukrainian].

Koson, J., Sriboon, P., Suteerasak, T., & Charoenruk, T. (2014). Seismic attributes and seismic geomorphology. *Engineering Journal*, 6(1), 1–9.

Krupskyi, Yu. Z. (2001). *Geodynamic conditions of formation and hydrocarbon potential of the Carpathian and Volyn-Podillia regions of Ukraine*. UkrDGRI [in Ukrainian].

Kurovets, I. M., Senkovskyi, I. M., Mykhailov, V. A., Dryhant, D. M., Krupskyi, Yu. Z., Hladun, V. V., Chepil, P. M., Hulii, V. M., Kurovets, S. S., Shlapinskyi, V. S., Shlapinskyi, Yu. V., Koltun, Yu. V., Chepil, V. P., & Bodlak, V. P. (2014). *Unconventional hydrocarbon sources of Ukraine* (Book II). Nika-Center [in Ukrainian].

Kutas, R. I. (2021). Deep degassing and oil and gas potential of the Eastern (Ukrainian) Carpathians: Geodynamic and geothermal aspects. *Geophysical Journal*, 43(6) [in Ukrainian].

Luo, Y., Higgs, W. G., & Kowalik, W. S. (1996). Edge detection and stratigraphic analysis using 3D seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Mogahed, M. M., Abd El-Aziz, M. M., & El-Gohary, A. M. (2017). Application of tilt derivative to gravity and magnetic data in the delineation of structural features. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 6(2), 350–360.

Monchak, L., & Anikieiev, S. (2017). Reflection of the tectonic structure of the western region of Ukraine in gravimagnetic fields. *Geodynamics,* 2(23) [in Ukrainian].

Nechaieva, T. S., Shymkiv, L. M., Yentin, V. A., Drozdetskyi, V. V., Nikitash, L. P., & Drobakh, S. M. (2002). *Scheme of the gravitational field of Ukraine (Scale 1:200,000).* PDRGP "Pivnichheolohiia" [in Ukrainian].

Orliuk, M. I., Bakarzhiieva, M. I., & Marchenko, A. V. (2022). Magnetic characteristics and tectonic structure of the Earth's crust of the Carpathian oil and gas region as a component of complex hydrocarbon criteria. *Geophysical Journal*, 44(5), 77–105 [in Ukrainian].

Salem, A., Williams, S., Fairhead, J. D., Ravat, D., & Smith, R. (2008). Interpretation of magnetic data using tilt-angle derivatives. *Geophysics*, 73(1), L1–L10.

Silva, C., Marcolino, C., & Lima, F. (2005). Automatic Fault Extraction Using Ant Tracking Algorithm in the Marlim South Field, Campos Basin. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*.

Stewart, I. C. F., & Miller, D. T. (2018). Directional tilt derivatives to enhance structural trends in aeromagnetic grids. *Journal of Applied Geophysics*, 159, 514–523.

Yan, J. Y., Lv, Q. T., Chen, M. C., et al. (2015). Identification and extraction of geological structure information based on multi-scale edge detection of gravity and magnetic fields: An example of the Tongling ore concentration area. *Chinese Journal of Geophysics*, 58, 4450–4464.

Zaiats, Kh., & Yarysh, M. (1978). *Scheme of the structure surface of the pre-Riphean crystalline basement of the western regions with major faults.* LV UkrDGRI [in Ukrainian].

**Отримано редакцією журналу / Received: 13.08.25**
**Прорецензовано / Revised: 01.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Roman PETROKUSHYN[1], PhD Student**
**ORCID ID: 0000-0001-7639-8279**
**e-mail: petrokushin@gmail.com**

**Dmytro BEZRODNYI[1], Assoc. Prof.**
**ORCID ID: 0000-0001-7463-7133**
**e-mail: dmytrobezrodnyi@knu.ua**

**Giuseppe BANCALA[2], Senior Geoscientist**
**ORCID ID: 0000-0003-1843-1610**
**e-mail: GBancala@slb.com**

**Luciana DE LUCA[2], Staff Geophysicist**
**ORCID ID: 0000-0001-7717-1893**
**e-mail: LLuca@slb.com**

**[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine**
**[2]SLB (Schlumberger Italiana SpA) Via dell'Unione Europea, 4 20097 San Donato Milanese (MI) Italia**

# DETECTION OF GEOLOGICAL OBJECT BOUNDARIES USING THE GRAVITY TILT DERIVATIVE METHOD: A CASE STUDY OF THE CARPATHIAN FOREDEEP

***Background.*** ***The article presents a methodology and the results of its application for delineating object boundaries based on gravity data analysis. The primary focus is on identifying geological lineaments, such as faults and zones of increased fracturing, which are crucial for understanding the structural and tectonic framework and assessing the geothermal potential of the area. The Carpathian Foredeep was chosen as the study area due to its complex tectonic structure and its potential for geothermal and hydrocarbon resource exploration.***

***Methods.*** ***To analyze geological structures, the tilt derivative method of the gravity field (Tilt Derivative) was employed in combination with spectral analysis and Fourier transformation. The methodology includes several steps: calculating the gradient of the gravity field, smoothing, non-maximum suppression, and contour thresholding. This approach ensures high accuracy in determining the boundaries of geological objects and identifying discontinuities in the gravity potential function. The data analysis was conducted using gravity survey results within the Carpathian Foredeep.***

***Results.*** ***The application of the methodology allowed for the identification of regional and local lineaments corresponding to faults and zones of increased fracturing. These zones may serve as migration pathways for geothermal waters from deep heated areas to reservoir rocks, enhancing their prospectivity for exploration. A comparative analysis of the obtained results with existing geological maps confirmed the high accuracy of the methods. Additionally, new structures were identified that had not been previously recognized, highlighting the effectiveness of the proposed methodology.***

***Conclusions.*** ***The proposed methodology is an effective tool for the detailed delineation of fault and tectonic structures based on gravity data. Its application enables the refinement of the structural and tectonic framework of regions, the identification of new faults and zones of increased fracturing, which are critical for exploring geothermal and hydrocarbon resources. The methodology has broad potential for use in studies of complex geological objects, such as the Carpathian Foredeep, and can significantly improve the efficiency of geological exploration activities.***

***Keywords: Ukrainian Carpathian Foredeep, Edge Detection, gravity anomalies, spectral analysis, Tilt Derivative, geothermal exploration.***

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

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

UDK 54.027:546.22:549.76:551.44
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.04

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

Lala KHALILOVA, PhD (Geol. & Mineral.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0411-3216
e-mail: khalilovalala55@gmail.com
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

# HYDROCARBON PROSPECTIVITY OF THE ZYKH FIELD ASSOCIATED WITH PLIOCENE–MIOCENE DEPOSITS IN VIEW OF NEW 3D SEISMIC SURVEY DATA (ABSHERON OIL AND GAS BEARING REGION, AZERBAIJAN)

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц., Георгієм ЛІСНИМ*)

**Background.** *The hydrocarbon potential of the Zykh-Hovsan area is predominantly associated with the Lower Pliocene deposits of the Productive Series. However, at present, the main hydrocarbon-bearing unit in the Zykh-Hovsan field is the Qala Suite (QaS). The Miocene deposits underlying the Qala Suite have also been of particular interest in recent years. The present seismic studies were conducted in the view of new 3D seismic survey data.*

*The purpose of the studies was to detail the geological models of the Zykh structure, to identify and trace the zones of development of faults and to identify oil and gas prospects of both the Qala Suite and Miocene.*

**Methods.** *Seismic stratigraphy and sequence stratigraphy methods were chosen as the main research methods. Attribute analysis was also carried out.*

**Results.** *In order to expand the resources of the Zykh field, recommendations were prepared for drilling of exploratory and appraisal well №2 based on 3D seismic survey data. Geological and geophysical materials were prepared and analyzed to justify the selection of the location of exploratory wells. After analyzing the seismic cubes, 3 location points of the project prospecting wells were selected, from which the first priority well – Zykh-2 – was selected and recommended for drilling. The recommended exploratory well Zykh-2 is located on the eastern steep slope of the Zykh uplift, in an area where prospective seismic facies in the Qala Suite intervals and prospective targets in the Miocene section are reliably and confidently identified in the section. The presence of well-defined seismic attributes as well as seismic classes in the predicted part of the section all indicate the presence of probable traps here. The well solves the task of both searching for the lower part of the sedimentary cover not explored by drilling and exploring the peripheral (eastern) part of the reservoir of the Sub Kirmaky Suite.*

**Conclusions.** *The studies have shown that the prerequisites for oil and gas bearing capacity on the eastern slope of the Zykh uplift are the existing favorable regional conditions of petroleum system development, and also local favorable conditions, which consist in the presence of a screening formation elongated in the submeridional direction. The negative factors include the steep eastern slope of the Zykh uplift. Taking into account the results obtained and analytical data, the Zykh-2 exploratory well is recommended for drilling in the project location.*

**Keywords:** *oil and gas content, seismic facies, seismic attribute, project well, Qala deposits, Miocene deposits, 3D seismic survey.*

## Background

Zykh-Hovsan area is located in Surakhany district, southwestern part of Absheron Peninsula, in close proximity to the eastern edge of Baku, Republic of Azerbaijan (Fig. 1).

The first exploratory well was placed within Surakhany-Karachukhur (Karachukhur area) back in the 19th century, from that moment the study of the Zykh-Hovsan area began.

In 1937–1941, 1945–1949, 1949–1951 and 1955 seismic surveys were carried out using the reflected wave (RW) method, in 1977–1978. – in 1977–1978 by the common depth point (CDP) method.

Generalizations of geological and geophysical materials of the Absheron oil and gas bearing region, including the considered Zykh-Hovsan area, have been repeatedly carried out. The results of generalizations were presented in the published literature (Akhmedov, 2017; Ahmedov, Kerimova, & Khalilova, 2024; Akhmedov, & Khalilova, 2024; Akhmedov, Khalilova, & Kerimova, 2024).

Based on the results of geological and geophysical surveys and deep drilling, two fields have been discovered within the study area: Zykh in the west and Hovsan in the eastern part. Until recently, the Zykh field was at the late stage of development. To date, the Zykh field has been placed on reserve.

The Zykh field was discovered and commissioned in 1935. Drilling of well №12 resulted in the first commercial oil production from the IX horizon of the Balakhany Suite. In 1936–1940 oil deposits were discovered in the lower part of the (Productive Series) PS suites, namely UKS (Upper Kirmaky Sandy), KS (Kirmaky Suite), SKS (Sub-Kirmaky Suite) and QaS (Qala Suite). A total of 235 wells of various purposes have been drilled in the field, including 80 exploratory wells, 154 production wells and 1 appraisal well. As of 2001, there were 10 wells in the producing well stock.

CDP method – 3D seismic surveys were carried out in the Zykh-Hovsan area (Abdullayev, Riley, & Bowman, 2012).

Lithologic and stratigraphic characteristics of the section within the Zykh-Hovsan area are studied based on deep drilling data. There are mainly Neogene deposits of the ancient Caspian Sea, rocks of the Absheron and Akchagyl stages, Productive Series and partially Pontus deposits. Below the Pontus deposits lie Miocene rocks (Mamedov, 2008).

Miocene deposits within the Hovsan area were penetrated by drilling (well №1870). According to drilling data, these deposits are represented by plastic clays with sand interlayers. On seismic sections, the deposits are confined to (seismic horizon) SH-VI and SH-V, tentatively identified with the rocks in the inner and upper Miocene, respectively.

© Akhmedov Tofik, Khalilova Lala, 2025

The lower part of the PS is represented by the Qalin Suite (QaS), Sub-Kirmaky Suite (SKS), Kirmaky Suite (KS), Upper Kirmaky Sandy (UKS), and Upper Kirmaky Clayey (UKC) Suites.

The Qala Suite (QaS) is the basement suite of the Productive Series and occupies only the southern and southeastern part of the Absheron Peninsula. Its thickness increases from 0 to 385 m in the southern direction down the dip of the strata and reaches its maximum within the Bina-Hovsan depression.

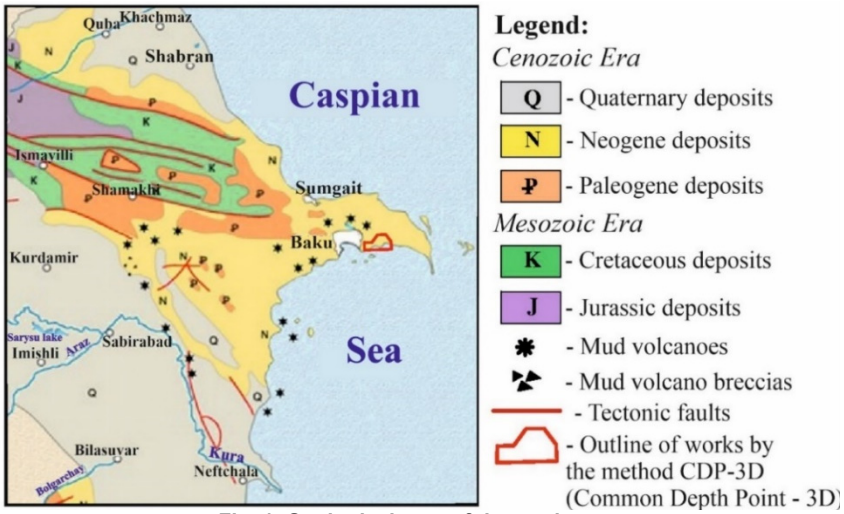



**Fig. 1. Geological map of the study area (Geological map of Azerbaijan, 2010; Akhmedov, & Khalilova, 2024)**

Here, geological prospecting and exploratory works have revealed a decrease in the thickness and, in some places, wedging upward along the uprise of the Qala Suite strata, which lie on the eroded surface of the Pontus deposits with a strongly pronounced angular unconformity. To the north of the sedge separating the Surakhany uplift from the Balakhany-Ramany uplift, no Qala Suite sediments are observed throughout the Absheron Peninsula. They are also absent in the appropriated parts of the folds.

The increase in thickness of the Qala Suite is due to the stratigraphic increase in its section as a result of new strata in the bottom of the suite (Alizade, Guliyev, & Mamedov, 2018).

Lithologically, the Qala Suite is characterized by alternating interbeds of clayey and sandy rocks. Sandy and silty rocks are represented by gray, light gray, in some places dark gray and yellow varieties. According to the data of granulometric analysis, sandy-siltstone rocks of the Qala Suite are poorly sorted. Clayey rocks are well thinned and contain only a small admixture of silty material; they are mainly gray, dark gray, thinly layered. The lower part of the formation is relatively more clayey.

The Zykh-Hovsan area is part of the East-Absheron syncline and covers the Zykh section of the Karachukhur-Zykh anticline, and the Hovsan area, partially, the Bina-Hovsan syncline.

The Karachukhur-Zykh anticline is the southernmost onshore uplift of the Sarygayabashy-Shah-deniz anticlinal zone, to which the largest oil and gas fields of Azerbaijan are confined. The Karachukhur-Zykh uplift in Pliocene deposits is an anticlinal fold of submeridional spreading with steep (45–500), long eastern and relatively smooth (22–250), short western flanks. The fold is sharply asymmetric in longitudinal section: the northern pericline is short, separated from the Surakhany fold by a well-defined wedge; the southern pericline is strongly elongated, dipping toward the sea, and can be traced to Gum Adasi. The length of the fold along the 2700 m isoline (PS top) is about 4.5 km, width – 3.5 km. The structure is complicated by two main longitudinal faults with an amplitude of 90–100 m. Transverse faults with an amplitude of 10–20 m are traced in the vault part of the fold. The Zykh uplift is the southern periclinal dip of the Karachukhur-Zykh anticline. In the area of Lake Zykh, the structure of the same name is complicated by a fossil mud volcano, which causes complex tectonics of the Zykh fold.

Thus, despite the fact that numerous wells have been drilled and geophysical surveys have been carried out using various methods in the Zykh-Hovsan area under study, many issues of the deep tectonics of the territory and the conditions for the formation of oil and gas deposits have not been fully elucidated.

The work area is located within the Absheron oil and gas bearing area of the Tersko-South Caspian oil and gas bearing province. Oil and gas bearing deposits are unevenly distributed here. The fields under development are concentrated in the central, southwestern, southern and eastern parts of the Absheron Peninsula and further south-eastward to the sea.

The main oil fields are located in the lower part of the Productive Series, to a greater extent in the Kirmaky, Sub-Kirmaky and Qala Suites.

The Qala Suite is the lowest deposit of the Pliocene Productive Series and is separated from the upstream SKS formation by a 4 m clay interbed. The total thickness of the QaS is 60 m at an average depth of 2,600 m; the weighted average oil saturated thickness is 7.5 m. Drilled wells have penetrated only the upper part of the Qala Suite. The first commercial oil was obtained in well 91 with oil flow rate of 98.5 tons per day and water flow rate of 14.2 tons per day.

Currently, the only oil and gas bearing object in the Hovsan-Zykh field is the Qala Suite. Since the beginning of development, the field has produced 4315.6 thousand tons of oil, 14720.7 thousand $m^3$ of water, 1560.3 million $m^3$ of dissolved gas, 27.3 million $m^3$ of free gas. Annual oil production at the field was 58.3 thousand tons, condensate production – 6.9 thousand tons, water – 556.1 thousand $m^3$, dissolved gas – 1.6 million $m^3$ (Salmanov et al., 2023).

In 2015, a deep well was drilled in the Hovsan area, adjacent to the Zykh field, which confirmed the assumptions about the oil and gas content of Miocene deposits and produced a fountain with a daily flow rate of about 100 tons per day (Ahmadov, 2025).

It should be noted that the available deep drilling data and seismic material do not allow us to determine a detailed geological model of oil traps in the Qala Suite and Miocene of the Zykh area.

Oil accumulation is presumably associated with lateral-facial alteration and low-amplitude faulting. These problems can be solved by detailed tracing of individual horizons and by using seismic and facies analysis of 3D seismic survey data with a clear relation to oilfield data.

**Method**

The Zykh field of Absheron Peninsula of Azerbaijan has been exploited since the 30s of the last century. The explored reserves of the field can be said to have been put into operation and they are running out. In order to expand the resource base, recommendations for drilling were prepared on the basis of geological and geophysical materials with the involvement of 3D seismic survey data. The entire volume of seismic material, as well as seismic attribute cubes, was analyzed when selecting options for the location of deep exploratory wells on the eastern slope of the field. In recent years, the works of many researchers have proposed new approaches to the application of seismic stratigraphy and sequence stratigraphy methods (Alekseeva, & Vazaeva, 2023; Seidov, & Khalilova, 2023). Seismic facies analysis and sequence-stratigraphic analysis are two powerful approaches in seismic interpretation, each providing unique insights into geologic history, reservoir distribution, and reservoir prediction (Leila et al., 2022; Sheriff, & Geldart, 1987). Both seismic facies and sequence-stratigraphic interpretation approaches were used to analyze the wave pattern, taking into account the quality of the seismic material achieved during processing.

In the seismic interpretation process, absorption and spectral energy attributes are used to extract additional information about geologic structures and fluid saturations. They are part of attribute analysis of seismic data, where derived attributes are calculated from the original seismograms to improve visualization or interpretation (Chopra, 2009). Absorption and spectral energy were chosen to perform seismic attribute information analysis.

Interval spectral energy maps were obtained in the interval of Qala Suite deposits and Miocene deposits. Interval spectral energy maps, which, as mentioned above, are a mean of attribute analysis of seismic data, made it possible to visualize the frequency behavior of the reflecting horizons in the interval between the reflecting surfaces. The location of this drilling point was chosen taking into account a favorable hypsometric position.

After analyzing the seismic cubes, 3 location points of the project exploratory wells were selected, from which the first priority well – Zykh-2 – was selected and recommended for drilling.

**Results**

Despite the fact that numerous wells have been drilled in the Zykh-Hovsan area under study and geophysical surveys have been carried out using various methods, many issues of the deep tectonics of the territory and the conditions for the formation of oil and gas deposits have not been fully elucidated.

As noted above, the Zykh field was discovered and put into operation in 1935 by well №12, which penetrated the Balakhany oil field of the IX layer. The oil bearing capacity of the field is confined to eight objects of the Productive Series: Qala Suite (QaS), Sub-Kirmaky Suite (SKS), Kirmaky Suite (KS), Upper Kirmaky Clayey (UKC) and Balakhany Suite (formations VI, VII, VIII, IX).

The deepest wells in the East Hovsan field, which is located to the east and not far from the Zykh field, are: № 1855, № 1856 and № 1864. Thus, while drilling well № 1855, 2 reservoirs with high gas values were discovered. Well №1856 also penetrated sandy formations below the established oil-bearing formations of the QaS2+QaS3 group and indexed as QaS4 and QaS5. Deep well №1864 penetrated a section similar to that of well №1855. It was also found that when the section below QaS3 is penetrated, the formation pressure reaches values that are attributed to Abnormal Formation Pressure (AFP), and the pressure anomaly coefficient reaches a value of 2.0 or more. As is known, according to the international classification, a section where the formation pressure exceeds hydrostatic pressure by 30% or more belongs to the AFP category. At the same time, it should be noted that according to the mining and geological conditions, the QaS4 and QaS5 formations are incompatible with the overlying QaS2-3 formations (Ahmedov, 2019).

The main volume of oil produced so far corresponds to the deposits of the Productive Series of the Lower Pliocene. But nowadays geologists and geophysicists are interested in oil and gas content of deeper deposits of Miocene, Eocene and Upper Cretaceous. The field under consideration is not an exception (Ahmadov, 2019).

The main objectives of the present studies are:
a) detailing geological models of the Zykh structure;
b) identification and tracing of zones of development of discontinuities, as well as areas of rock unconsolidation in the interval of the entire sedimentary cover section;
c) identification of oil and gas prospective objects.

In selecting options for the location of deep exploratory wells on the eastern slope of the Hovsan field, the entire volume of seismic material was analyzed, as well as cubes of seismic attributes of both mono-attributes and complex attributes (Alsadi, 2017; Fraser et al., 2008; Kirilov & Zakrevsky, 2014; Shimansky et al., 2011; Urupov, 2004).

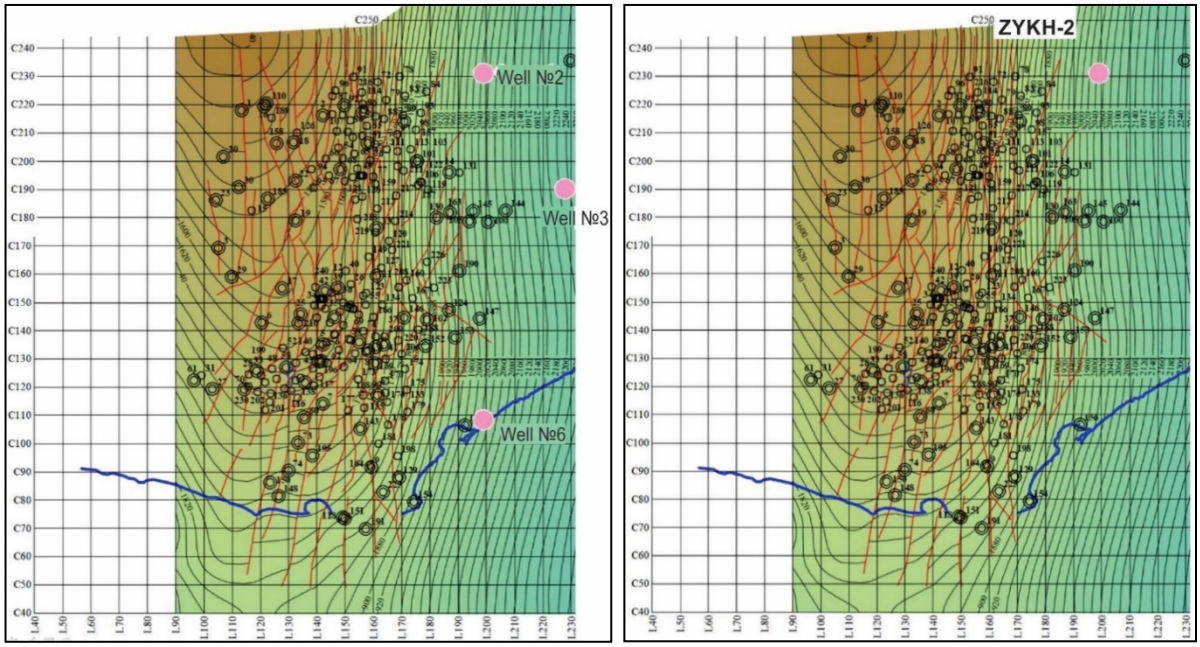
Such interpretation approaches as seismic-facies and sequence-stratigraphic were used to analyze the wave pattern, taking into account the quality of seismic material achieved during processing.

After analyzing the seismic cubes, 3 location points of the project exploratory wells were selected (Fig. 2a), from which the first-priority well – Zykh-2 was selected and recommended for drilling (Fig. 2b).

Exploratory well № 2 (Fig. 2a) is located on the eastern tectonic block of the Zykh uplift (crossline 230, Inline 200). The status of the well is exploratory, project depth for penetration of objective horizons is 3100–4300 m, project horizons are SKS, QaS, Miocene. Project bottom hole is 4500 m.

Exploratory well № 3 (Fig. 2a) is located on the eastern tectonic block of the Zykh uplift (crossline 190, Inline 230). The status of the well is exploratory, the project depth for penetration of objective horizons is 3100–4200 m, the project horizons are QaS, Miocene.

Exploratory well № 6 (Fig. 2a) is located on the eastern tectonic block of the Zykh uplift (crossline 110, Inline 200). The status of the well is exploratory, the project depth for penetration of objective horizons is 3000–3900 m, the project horizons are SKS, QaS, Miocene.




*a* *b*

**Fig. 2. Location options for exploratory wells at the Zykh field (a) and project well № 2 at the Zykh field (b)**

The recommended exploratory well Zykh-2 (Fig. 2b) is located on the eastern abrupt slope of the Zykh uplift and is characterized by the following features:

• is located in an area where the section reliably and confidently identifies promising seismic facies in the Qala Suite intervals and perspective objects in the Miocene section;

• the presence of well-defined seismic attributes as well as seismic classes in the predicted part of the section all indicate the presence of probable traps;

• the well solves the task of both exploration of the lower part of the sedimentary cover not explored by drilling and exploration of the peripheral (eastern) part of the reservoir formation of the Sub-Kirmaky Suite.

Figs. 3–4 show seismic and geologic sections of the eastern flank of the Zykh fold, indicating the expected trap types confined to the Qala Suite (IIIa, IV) and Miocene (V, VI) that may be penetrated by the projected well.

Types of traps expected to be penetrated by the Zykh-2 well (Fig. 5a and 5b):

1 – stratigraphic, wedging upward along the uprise (Qala Suite formations);

2, 3 – stratigraphic, replacement, screened by clay diapir (Miocene deposits).

3 – lithologic, weathering crust.

When analyzing, the informativity of seismic attributes, absorption and spectral energy were selected. Figures 6–7 show maps of interval spectral energy in the interval of Qala Suite deposits and Miocene deposits. The location of this point was chosen taking into account the favorable hypsometric position.

In the system of longitudinal disturbances identified on the fragment of the map of the predicted trap contour in Miocene deposits (Fig. 8), it can be seen that the project well Zykh-2 is located at a sufficient distance from the disturbance zone.

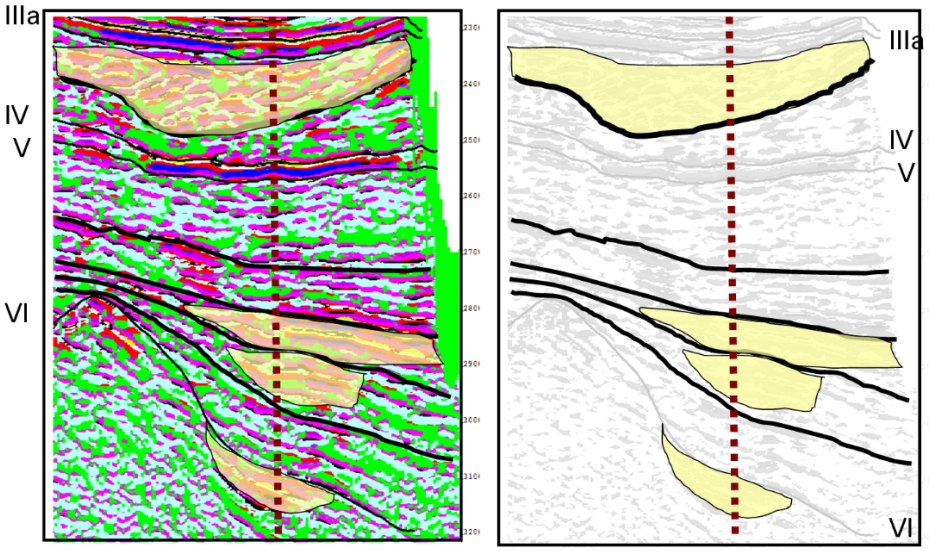



**Fig. 3. Seismic-geologic section along Inline 200 showing the eastern flank of the Zykh fold: seismic horizons confined to the Qala Suite (IIIa, IV) and Miocene (V, VI)**

ISSN 1728-3817

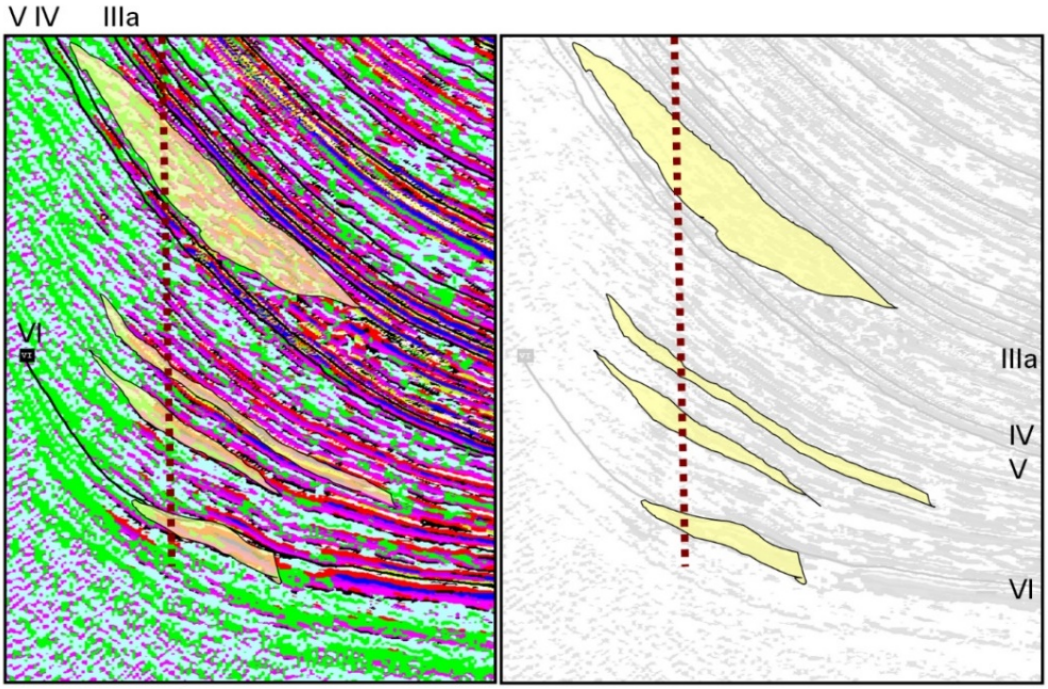



**Fig. 4. Seismic-geologic section along fold 230 showing the eastern flank of the Zykh fold: seismic horizons confined to the Qala Suite (IIIa, IV) and Miocene (V, VI)**

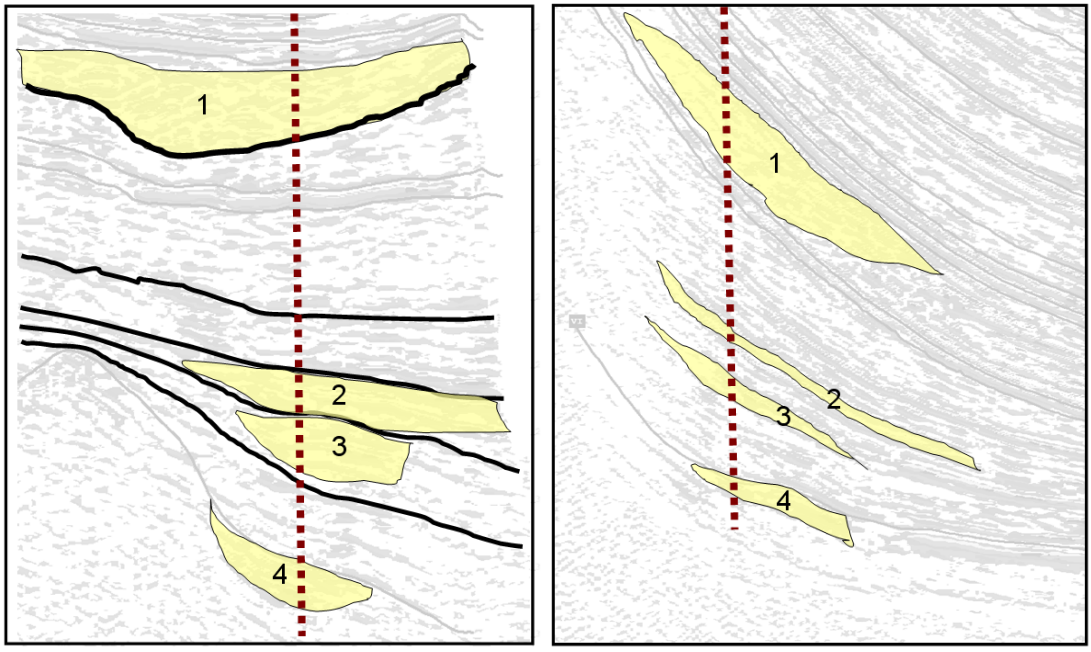



**Fig. 5. Hydrocarbon trap types:**
a – Inline 200; b – Crossline 230; 1 – stratigraphic, wedging upward along the uplift (Qala Suite formations); 2, 3 – stratigraphic, replacement, screening by clay diapir (Miocene deposits); 4 – lithologic, weathering crust

**Discussion and conclusions**

Thus, the studies have shown that the prerequisites for oil and gas bearing capacity on the eastern slope of the Zykh uplift are the existing favorable regional conditions for oil system development. And also local favorable conditions, which consist in the presence of screening strata, elongated in the submeridional direction. To the negative factors we include the presence of the abrupt eastern slope of the Zykh uplift. Taking into account the obtained results and analytical data, the Zykh-2 exploratory well is recommended for drilling in the project location.

The main geologic risks to the Miocene deposit we consider to be trap risk and reservoir risk.

The main geologic risks for the Qala Suite formations are mainly trap risk and, to a lesser extent, reservoir risk.

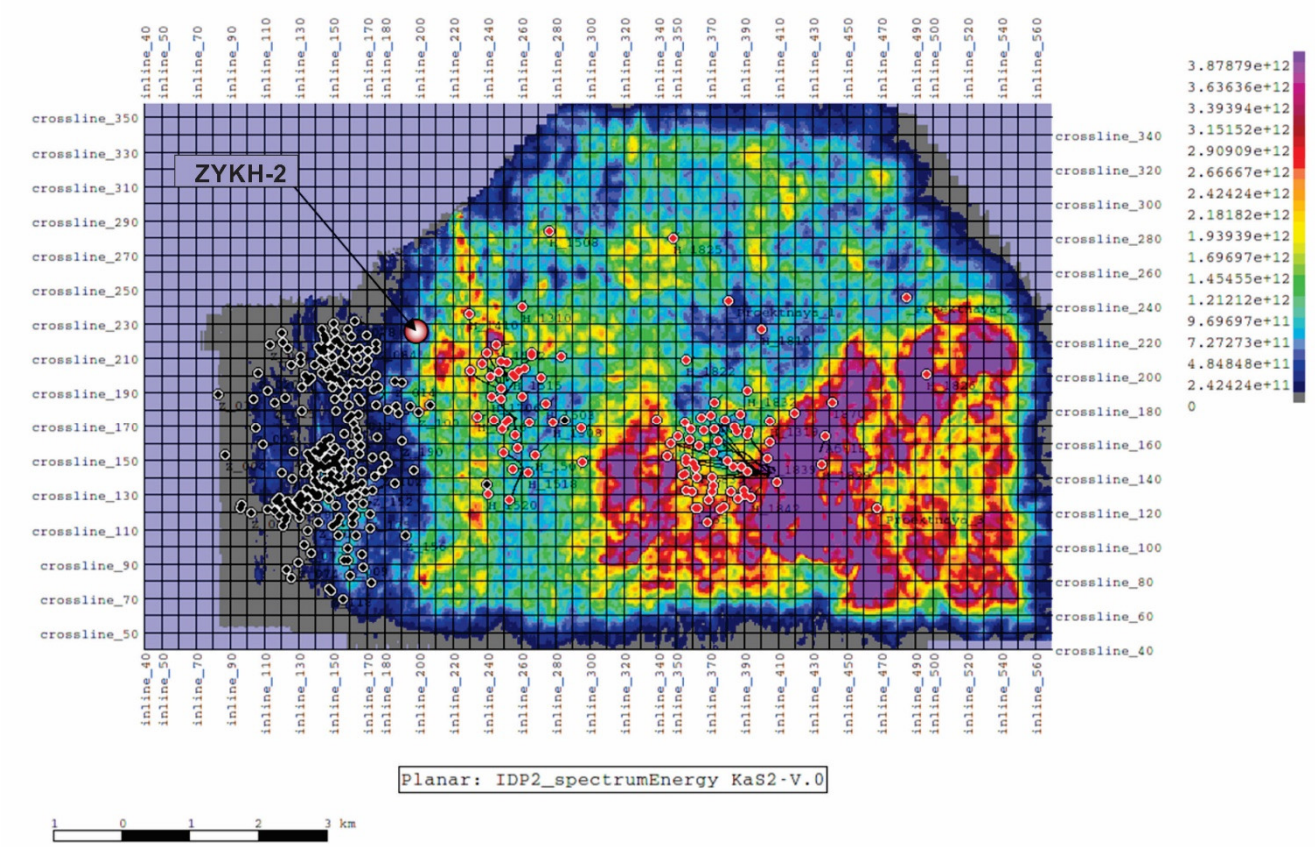



Fig. 6. Map of interval spectral energy in the Qala Suite deposits interval

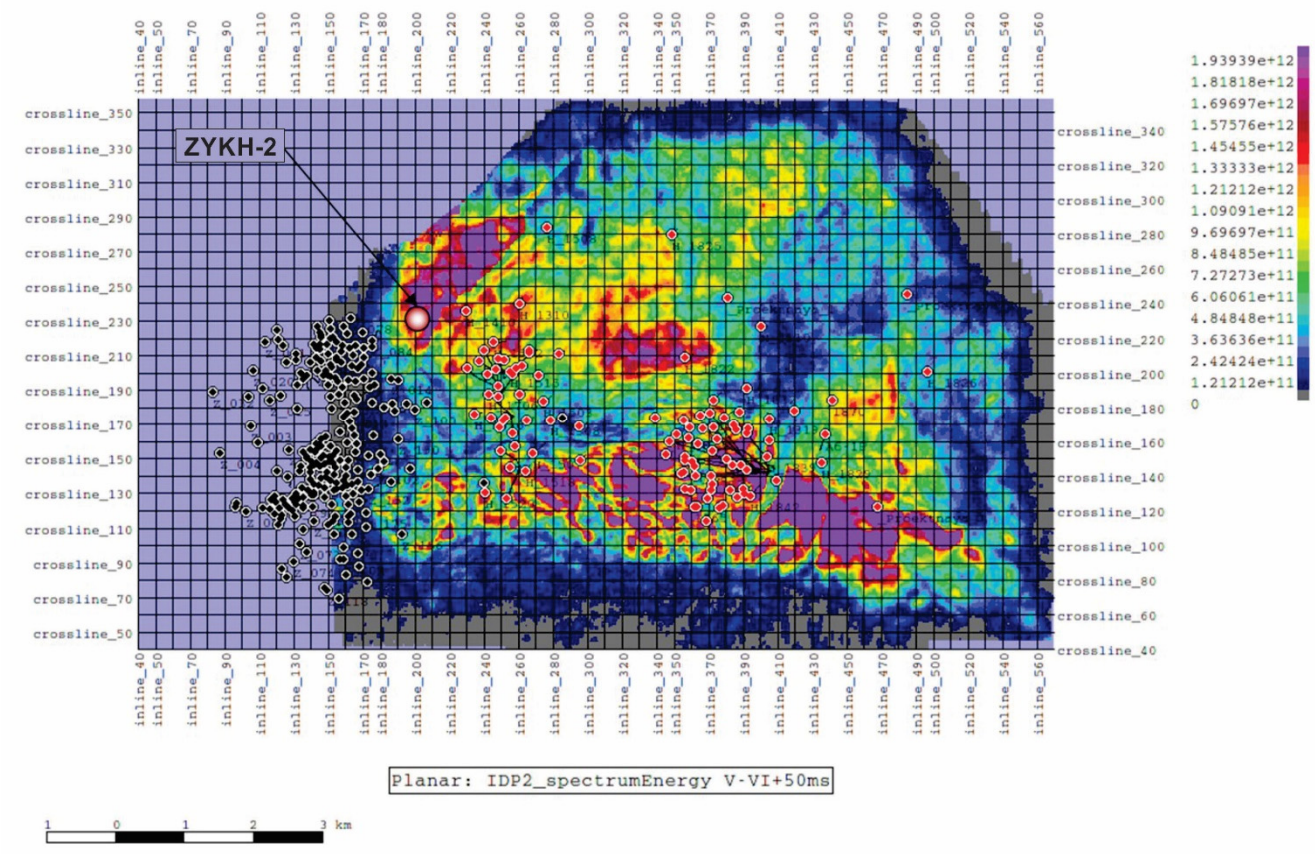



Fig. 7. Map of interval spectral energy in the Miocene deposit interval

ISSN 1728-3817

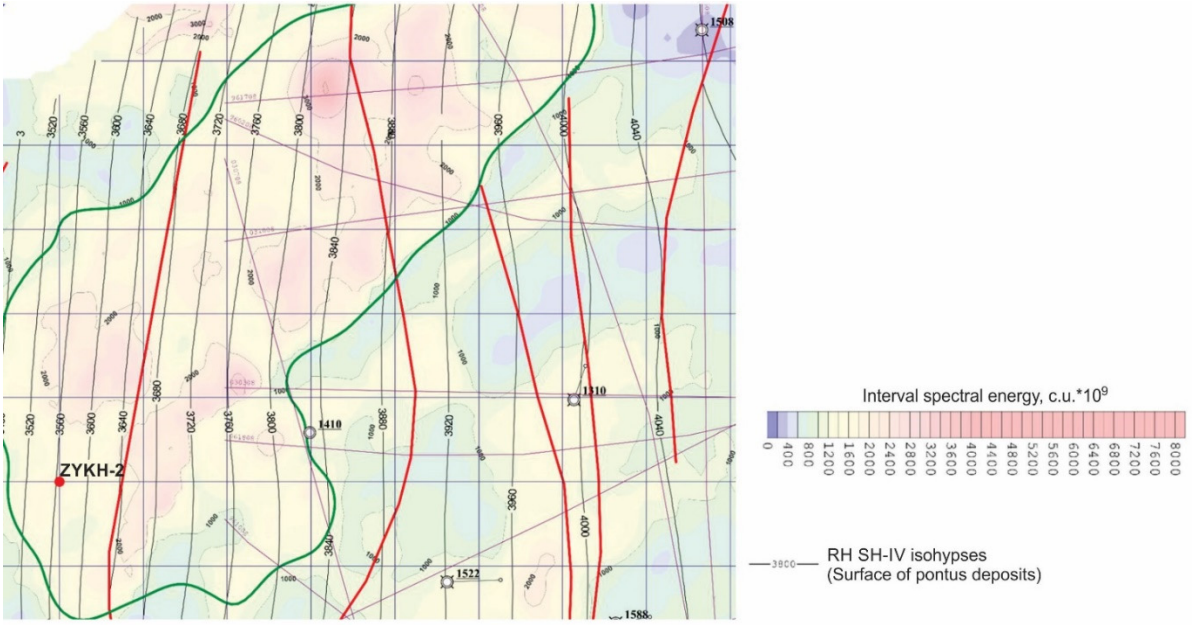



**Fig. 8. Map fragment of the predicted trap contour in Miocene deposits**

**Authors' contribution:** Tofik Akhmedov – conceptualization, methodology, writing (original draft), formal analysis; Lala Khalilova – data validation, writing (review and editing).

**Sources of funding.** This study did not receive any grant from a funding institution in the public, commercial, or non-commercial sectors.

**References**

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. Bo hacs, & D. Nummedal (Eds.), *Lacustrine sand stone reservoirs and hydrocarbon systems* (American Association of Petroleum Geologists Memoir 95). American Association of Petroleum Geologists.

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

Ahmedov, T. R. (2019). On oil and gas prospects of the Azerbaijan Zikh field in the light of new 3D seismic data. *Vector of Geosciences*, 2(2), 25–32 [in Russian]. [Ахмедов, Т. Р. (2019). Новые нефтегазоносные объекты месторождения Зых Азербайджана по данным сейсморазведки 3D. *Вектор ГеоНаук*, 2(2), 25–32].

Akhmedov, T. R. (2017). Effective thickness and Miocene deposits producibility on Absheron oilfields of Hovsan block, Azerbaijan, Using 3D seismic survey. *Oil and Gas Geology*, 4, 103–107 [in Russian]. [Ахмедов, Т. Р. (2017). Нефтегазоносность ПТ и миоценовых отложений на площади Говсан Азербайджана по сейсмическим данным 3D. *Геология нефти и газа*, 4, 103–107].

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. https://doi.org/10.15421/112420

Alekseeva, O. A., & Vazaeva, A. A. (2023). Application of CDP 3D seismic exploration in the search for oil and gas traps in the northern part of the Timan-Pechora oil and gas province. *Geology and Geochemistry of Combustible Minerals*, *5*, 43–54 [in Russian]. [Алексеева, О. А., & Вазаева, А. А. (2023). Применение сейсморазведки МОГТ 3D при поисках ловушек нефти и газа в северной части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. *Геология и геохимия горючих полезных ископаемых*, 5, 43–54].

Alizade, A. A., Guliyev, I. S., & Mamedov, P. Z. (2018). *Productive series of Azerbaijan* (Vol. 2). Nedra [in Russian]. [Ализаде, А. А., Гулиев, И. С., Мамедов, П. З. (2018). *Продуктивная толща Азербайджана* (Т. 2). Недра].

Alsadi, H. N. (2017). 3D Seismic Reflection Surveying. In *Seismic Hydrocarbon Exploration* (pp. 165–182). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40436-3_7

Chopra, S. (2009). Interpreting fractures through 3D seismic discontinuity attributes and their visualization. *Arcis Corporation*, 34(8). https://csegrecorder.com/articles/view/interpreting-fractures-through-3d-seismic-discontinuity-attributes

Fraser, B., Anders, B., Jose, K. A., Entoni, K., & Denis, K. (2008). Seismic Inversion: Reading Between the Lines. *Oil and Gas Review*, 50–75 [in Russian]. [Фрейзер, Б., Андерс, Б., Хосе, К. А., Энтони, К., Денис, К. (2008). Сейсмическая инверсия: читая между строк. *Нефтегазовое обозрение*, 50–75].

Kirilov, A. S., & Zakrevsky, K. E. (2014). *Workshop on seismic interpretation in PETREL*. MAI-PRINT Publishing House [in Russian]. [Кирилов, А. С., & Закревский, К. Е. (2014). *Практикум по сейсмической интерпретации в PETREL*. Издательство МАИ-ПРИНТ].

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

Mamedov, P. Z. (2008). On the causes of rapid downwarping of the earth's crust in the South Caspian basin. *Azerbaijan Oil Industry*, 1, 9–15 [in Russian]. [Мамедов, П. З. (2008). О причинах быстрого прогибания земной коры в Южно-Каспийской впадине. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 1, 9–15].

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

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

Sheriff, R., & Geldart, L. (1987). *Seismic survey* (Vol. 2). Mir Publishing House.

Shimansky, V. V., Ronin, A. L., Rylkov, V. A., Karaev, N. A., & Shimansky, S. V. (2011). Geological interpretation of seismic data during regional and prospecting work in complex environments. *Oil and Gas Geology*, 4, 68–73 [in Russian]. [Шиманский, В. В., Ронин, А. Л., Рыльков, В. А., Караев, Н. А., & Шиманский, С. В. (2011). Геологическая интерпретация данных сейсморазведки при региональных и поисковых работах в сложнопостроенных средах. *Геология нефти и газа*, 4, 68–73].

Urupov, A. K. (2004). *Fundamentals of three-dimensional seismic exploration*. Russian State University of Oil and Gas [in Russian]. [Урупов, А. К. (2004). *Основы трехмерной сейсморазведки*. Нефть и газ].

**Отримано редакцією журналу / Received: 03.08.25**
**Прорецензовано / Revised: 06.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Тофік АХМЕДОВ, д-р геол.-мінерал. наук, проф.**
**ORCID ID: 0000-0003-0634-5600**
**e-mail: ahmedovtofiq47@gmail.com**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

**Лала ХАЛІЛОВА, канд. геол.-мінерал. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0003-0411-3216**
**e-mail: khalilovalala55@gmail.com**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

# ВУГЛЕВОДНЕВА ПЕРСПЕКТИВНІСТЬ РОДОВИЩА ЗИХ, ПОВ'ЯЗАНА З ПЛІОЦЕН-МІОЦЕНОВИМИ ВІДКЛАДЕННЯМИ З ОГЛЯДУ НА НОВІ ДАНІ 3D СЕЙСМОРОЗВІДКИ (АПШЕРОНСЬКИЙ НАФТОГАЗОНОСНИЙ РАЙОН, АЗЕРБАЙДЖАН)

**В с т у п .** ***Вуглеводневий потенціал Зих-Говсанського району пов'язаний переважно з відкладеннями нижнього пліоцену продуктивної серії. Однак на даний момент основною вуглеводненосною одиницею Зих-Говсанського родовища є калинська свита (QaS). Міоценові відкладення, що лежать під свитою Кала, також становлять особливий інтерес в останні роки. Дані сейсморозвідувальні дослідження було проведено з урахуванням нових даних сейсморозвідки 3D.***

***Мета досліджень полягала в деталізації геологічних моделей будови Зих, виявленні та відстеженні зон розвитку розломів і виявленні нафтогазоносних перспектив як калинської світи, так і міоцену.***

**М е т о д и .** ***Як основні методи дослідження обрано методи сейсмічної стратиграфії та секвенційної стратиграфії. Також проведено аналіз ознак.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***З метою розширення ресурсів родовища Зих підготовлено рекомендації щодо буріння розвідувально-оцінювальної свердловини № 2 за даними сейсморозвідки 3D. Підготовлено та проаналізовано геолого-геофізичні матеріали для обґрунтування вибору місця проведення пошукових свердловин. Після аналізу сейсмічних кубів було обрано 3 точки розташування проєктних пошукових свердловин, з яких обрано та рекомендовано до буріння першочергову свердловину – Зих-2. Рекомендована розвідувальна свердловина Зих-2 розташована на східному крутому схилі Зихського підняття, в районі, де в розрізі достовірно і впевнено виділено перспективні сейсмічні фації в інтервалах каланської свити і перспективні цілі в міоценовому розрізі. Наявність чітко визначених сейсмічних атрибутів, а також сейсмічних класів у прогнозованій частині розрізу вказують на наявність тут імовірних пасток. Свердловина вирішує завдання як пошуку нерозвіданої бурінням нижньої частини осадового чохла, так і дослідження периферійної (східної) частини пласта підкірмаківської світи.***

**В и с н о в к и .** ***Дослідження показали, що передумовами нафтогазоносності східного схилу Зихського підняття є наявні сприятливі регіональні умови розвитку нафтогазової системи. А також локальні сприятливі умови, які полягають у наявності екрануючого утворення, витягнутого в субмеридіональному напрямку. До негативних факторів можна віднести крутий східний схил підняття Зих. Враховуючи отримані результати та аналітичні дані, розвідувальна свердловина Зих-2 рекомендована до буріння на проєктному місці.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***нафтогазоносність, сейсмічна фація, сейсмічний атрибут, проєктна свердловина, родовища Кала, міоценові відклади, сейсморозвідка 3D.***

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

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

# МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

UDC 548.549.5 (477)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.05

Oleksandra PAVLIUK, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0001-5234-2908
e-mail: alia.pavliuk@gmail.com
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Viacheslav PAVLIUK
ORCID ID: 0000-0002-7035-8505
e-mail: v-pavlyuk@ukr.net
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Oleh SEMENIV, PhD (Engin.)
ORCID ID: 0000-0002-4286-5876
e-mail: olegsemeniv@gmail.com
M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

# RUTILE FROM THE CRYSTALLINE ROCKS OF THE SOUTHWESTERN PART OF THE UKRAINIAN SHIELD

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол.-мін. наук, проф., Василем ЗАГНІТКОМ*)

**Background.** ***Rutile is a widespread accessory mineral in crystalline rocks of the Ukrainian Shield, notable for its geochemical stability and capacity to incorporate trace elements like Nb, Fe, V, Zr, Al and a wide range of other trace elements. The aim of this study is to analyze the color, morphology, and chemical composition of rutile from indigenous crystalline rocks of the southwestern part of the Ukrainian Shield in order to identify diagnostic features characteristic of different rock types, as well as to enable stratigraphic reconstructions and track the migration of sedimentary rutile.***

**Methods,** ***Samples and Analytical details. The study is based on the analysis of 363 rutile crystals extracted from 57 heavy mineral concentrate samples, as well as textual archival materials from 11 geological surveys conducted by the Right-Bank Geological Expedition between 1972 and 2009. The samples represent rutile from various lithotypes, including granites, gneisses, pegmatites, enderbites, ultrabasic rocks, and other crystalline formations of the southwestern part of the Ukrainian Shield. Binocular microscopy and SEM-EDS analysis were used to examine rutile morphology and chemical composition.***

**Results.** ***Rutile content ranges from 0.8 g/t in enderbites to 109.4 g/t in sillimanite-biotite gneisses. Most crystals are black or dark brown and acicular in form, often included in quartz or biotite. The majority (72 %) of rutile samples contain trace impurities, with V, Nb, Cr, and Fe being most common. Impurity patterns vary with rock type, metamorphic grade, and regional distribution. Northern rocks (e.g., Fastiv area) show Nb–V–Fe associations; southern samples often contain isolated V. Chromium-bearing rutile was discovered in migmatized metabasites in the Berdychiv area.***

**Conclusions.** ***Rutile preserves the geochemical signature of its host rocks and reflects both lithological and metamorphic conditions. It can serve as a reliable indicator mineral for reconstructing the provenance of sedimentary rutile, and Nb–Cr trace element associations may assist in identifying potentially diamond-bearing source rocks.***

**Keywords:** ***Rutile, southwestern part of the Ukrainian Shield, crystalline rocks, chemical composition.***

## Background

Rutile is a widely distributed mineral in both crystalline and sedimentary rocks of the Ukrainian Shield (USh) and its slopes. Due to its high stability and the presence of impurities such as Nb, Ta, and other highly charged elements, it can be used in prospecting, genetic mineralogy, studies of geochemical processes in the crust and mantle, as well as a mineralogical geothermobarometer, among other geochemical studies (Baldwin, & Brown, 2008; Banfield, & Veblen, 1991; Bangaku Naidu et al., 2019; Foley, Barth, & Jenner, 2000; Luvizotto, & Zack, 2009; Malkov, 2008; Meinhold, 2010; Meinhold et al., 2008; Preston et al., 2002; Rudnick et al., 2000; Tomkins, Powell, & Ellis, 2007; Triebold et al., 2012; Watson, Wark, & Thomas, 2006; Xiao et al., 2006; Zack et al., 2002; Zack, Moraes, & Kronz, 2004; Zack et al., 2011). In Ukraine, most scientific works are focused on the study of rutile from sedimentary rocks (Tsymbal, 2014; Tsymbal, Shumlyanskyy, & Tsymbal, 2018; Vyshnevskyi, 2023). In previous works (Pavliuk, & Pavliuk, 2018; Pavliuk, 2019a; 2019b), we also studied rutile from many placers of the southwestern part of the Ukrainian Shield. However, to accurately determine the origin of this mineral from specific indigenous sources and trace the directions of its transport to the placer, we lacked information about the peculiarities of its chemical composition in the 'local' host rocks forming the crystalline basement. Therefore, we have dedicated this study to examining the color, morphology and chemical composition of rutile from native rocks and identifying markers characteristic of different rock types and regions within the southwestern part of the Ukrainian Shield. Our findings provide important information for a more precise determination of the origin of sedimentary rutile.

## Methods

For analytical purposes, mineralogical duplicates and textual archival materials from 11 geological surveys of the Right-Bank Geological Expedition were used for the period from 1972 to 2009 on the territory of the Dnister-Buh and Ros-Tikych megablocks and their framing areas. Samples for mineralogical analysis were taken from the core of crystalline rocks. The sampling interval ranged from 1.0 to 3.0 m, with each sample weighing up to 5 kg. Mineralogical sample processing included grinding to 1 mm, washing on a concentration table, finishing to a "gray concentrate" on a tray, separation of the mineral concentrate in bromoform into light and heavy fractions, and then separation of the heavy fraction into magnetic and electromagnetic fractions. Mineralogical analysis was carried out under a binocular microscope.

© Pavliuk Oleksandra, Pavliuk Viacheslav, Semeniv Oleh, 2025

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

To study the morphology and chemical composition of rutile, 363 crystals were handpicked from 57 heavy mineral concentrates of rock samples. Specifically, the study included 2 samples from vein quartz, 4 from Zhytomyr and Zvenyhorodka granites, 2 from pegmatites, 4 from metasomatites, 10 from gneisses, 2 from quartzites, 8 from Berdychiv granites, 3 from migmatites, 2 from charnockites, 5 from enderbites, 1 from basalt, 4 from gabbroids, 2 from diabases, 6 from crystalline schists, and 1 from ultrabasite. The heterogeneity of our samples is due to the varying distribution of the represented rock types within the study area and the availability of their samples, as well as the variable rutile content within them. In some rocks, the rutile content reaches up to grams per ton, while in others, only a few grains are present in the entire sample. Rutile crystals were selected and their color evaluated using a binocular microscope equipped with a cold-light LED lamp. The selected crystals were then fixed in epoxy, polished, carbon-coated to ensure conductivity, and analyzed using a GSM-6700F scanning electron microscope with a JE-2300 energy-dispersive system. All analyses were conducted using a 20 kV accelerating voltage, a beam current of 0.75 nA, a beam size of 1 μm, and a counting time of 60 seconds per analysis. The theoretical detection limits in SEM-EDS measurements are approximately 0.1 wt%: ~0.5–1.0 wt% for light elements, ~0.1–0.5 wt% for transition metals, and ~0.1 wt% for heavy metals (Z>30).

**Results**

***The average content of rutile in crystalline rocks***. To estimate the rutile content in the crystalline rocks of the southwestern part of the USh, relevant information from geological reports of previous years was collected and processed (Dovgan et al., 1985; Dovgan et al., 1989; Kulyk, 1996; Lyashko et al., 1986; Slynko, & Bondar, 1972; Zabiyaka et al., 1974; Yangicher et al., 1982 and other reports). It was found that the average content of rutile varies within quite wide limits: from 0.8 g/t in enderbites to 36.8 g/t in gneisses. The highest amount was found in sillimanite-biotite gneisses enriched with garnet and graphite – 109.4 g/t, and abnormally high content was recorded in some rocks (Tab. 1).

*Table 1*

**Abnormally high rutile content in the crystalline rocks of the southwestern part of the Ukrainian Shield, g/t**

| Area | Sample No. | Rock types | Rutile content, g/t | Author |
|---|---|---|---|---|
| Fastiv | 2CT-215 | Silimanite-biotite gneiss | 1530 | Slynko, Bondar, 1972 |
| Fastiv | 409-36 | Two-mica granite | 1870 | Dovgan et al., 1985 |
| Skvyra | 96K-17 | Biotite migmatite | 4900 | Kulyk, 1996 |
| Berdychiv | 1631-39 | Pegmatite | 2230 | Zabiyaka et al., 1974 |
| Vinnytsia | 728-124 | Skarn | 2193 | Liashko et al., 1986 |
| Haivoron | 445-1 | Sillimanite-garnet-biotite gneiss | 3300 | Dovgan et al.,1989 |
| Haivoron | 15783-1 | Garnet-graphite-biotite gneiss | 1770 | Yangicher et al., 1982 |

The average content of rutile, ilmenite, and titanite in the main rock types of the southwestern part of the USh was calculated based on the database we collected, consisting of 8,129 mineralogical analyses (Table 2).

*Table 2*

**Average content of titanium minerals in main rock varieties of the southwestern part of the Ukrainian Shield**

| Rock types | No. of samples | Average content, g/t | | | Sum, g/t | Percentage of total titanium mineral content | | | Percentage of accessory minerals* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Rutile | Ilmenite | Titanite | | Rutile | Ilmenite | Titanite | |
| Igneous rocks | | | | | | | | | |
| Granites | 1452 | 8.5 | 546.4 | 100.5 | 655.4 | 1.3 | 83.4 | 15.3 | 12.4 |
| Pegmatites | 500 | 15.5 | 184.1 | 58.2 | 258.1 | 6.0 | 71.4 | 22.6 | 7.7 |
| Gabbroids | 348 | 1.2 | 1993.5 | 123.5 | 2118.2 | 0.1 | 94.1 | 5.8 | 29.3 |
| Diabases** | 29 | 2.4 | 4743.4 | 166.9 | 4912.7 | 0.01 | 96.59 | 3.4 | 36.3 |
| Pyroxenites | 229 | 1.2 | 1515.1 | 61.6 | 1557.9 | 0.1 | 96.0 | 3.9 | 23.6 |
| Ultrabasites | 301 | 4.3 | 341.6 | 7.1 | 353.0 | 1.2 | 96.8 | 2.0 | 8.6 |
| Metamorphic rocks | | | | | | | | | |
| Gneisses | 1140 | 36.8 | 780.1 | 110.3 | 927.2 | 4.0 | 84.1 | 11.9 | 15.9 |
| Crystalline schists | 1095 | 2.9 | 1308.1 | 247.5 | 1558.5 | 0.2 | 83.9 | 15.9 | 35.1 |
| Migmatites | 417 | 23.4 | 460.9 | 160.0 | 644.3 | 3.6 | 71.6 | 24.8 | 11.5 |
| Charnockites | 65 | 10.3 | 1795.6 | 37.7 | 1843.6 | 0.6 | 97.4 | 2.0 | 27.4 |
| Enderbites | 166 | 0.8 | 2257.6 | 86.5 | 2344.9 | 0.03 | 96.3 | 3.7 | 33.2 |
| Amphibolites | 345 | 5.1 | 461.4 | 934.8 | 1401.3 | 0.4 | 32.9 | 66.7 | 22.0 |
| Magnetite quartzites | 217 | 0.9 | 161.2 | 0.8 | 162.9 | 0.55 | 98.95 | 0.5 | 0.8 |
| Calciphyres | 900 | 6.1 | 382.5 | 514.3 | 902.9 | 0.6 | 42.4 | 57.0 | 24.2 |
| Metasomatites | 392 | 4.1 | 412.9 | 294.9 | 711.9 | 0.6 | 58.0 | 41.4 | 16.5 |

***Note:*** * Percentage of total accessory minerals in the given set; ** titanomagnetite predominates in diabases.

A significant number of rutile analyses allow us to substantiate conclusions regarding the distribution patterns of titanium minerals, namely:

1. Rutile is least common among Ti minerals.
2. Rutile is most common in sub-acidic (gneisses, migmatites, charnockites) and acidic (granites, pegmatites) rocks of the southwestern part of the USh.
3. The specific content of rutile in the total mass of titanium minerals is maximum in pegmatites, and somewhat lower in migmatites and gneisses. Note that the real content of rutile in pegmatites is underestimated due to the impossibility of fixing its small inclusions in quartz by standard mineralogical analysis.
4. In the group of rocks of basic-ultrabasic composition, the highest percentage of rutile was found in ultrabasites (1.2 %).
5. In calcium-enriched parasedimentary rocks: amphibolites, calciphyres, as well as various metasomatites, there is a predominance of titanite over ilmenite.
6. In intrusive and volcano-sedimentary rocks of subbasic-basic composition, such as enderbites, crystalline schists, gabbroids, and diabases, titanium minerals constitute one-third of all accessory minerals.

ISSN 1728-3817

***The color range of rutiles.*** 234 crystals approximately 0.05 mm in size were selected for color assessment. Statistical data on the color of rutile are provided in Table 3.

As we can see from the Table, the absolute majority of rutile grains are black (68.2 %), much less – dark brown (18.4 %). Crystals of these colors absolutely dominates even in acidic rocks: granites, pegmatites, and vein quartz. Rutile of gabbro-amphibolites is mainly characterized by light brown varieties. Greenish rutiles make up 50 % of all rutiles of magnetite quartzites. Rutiles of this color contain an extremely large number of inclusions, which probably cause this color. Rutiles of other colors are quite rare.

***Table 3***

**Color of rutile in the crystalline rocks**

| Rock types | No. of crystals | Black | Dark brown | Reddish | Light brown | Yellow | Greenish |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Igneous rocks* | | | | | | | |
| Granites, pegmatites | 48 | 32 | 16 | | | | |
| Gabro-amphibolites | 6 | | | | 6 | | |
| Diabases | 3 | 2 | | | 1 | | |
| Basalts | 10 | 4 | 2 | | 2 | 1 | 1 |
| Ultrabasites | 4 | | 3 | | 1 | | |
| *Metamorphic rocks* | | | | | | | |
| Vein quartz | 11 | 9 | | | 2 | | |
| Magnetite quartzites | 2 | | 1 | | | | 1 |
| Gneisses | 89 | 69 | 7 | 2 | 7 | 2 | 2 |
| Crystalline schists | 21 | 19 | 2 | | | | |
| Migmatites | 8 | 1 | 7 | | | | |
| Charnockites | 14 | 10 | 1 | | 3 | | |
| Enderbites | 11 | 9 | 2 | | | | |
| Metasomatites | 7 | 5 | 2 | | | | |
| Total., No. crystals | 234 | 160 | 43 | 2 | 22 | 3 | 4 |
| Total, % | 100 | 68,2 | 18,4 | 0,9 | 9,4 | 1,3 | 1,7 |

***Morphology of rutile.*** Rutile, extracted from the heavy fractions of crystalline rocks, is predominantly represented by angular fragments, with a significantly smaller proportion of better preserved crystals of elongated prismatic form, measuring 0.05–0.3 mm (Fig. 1).

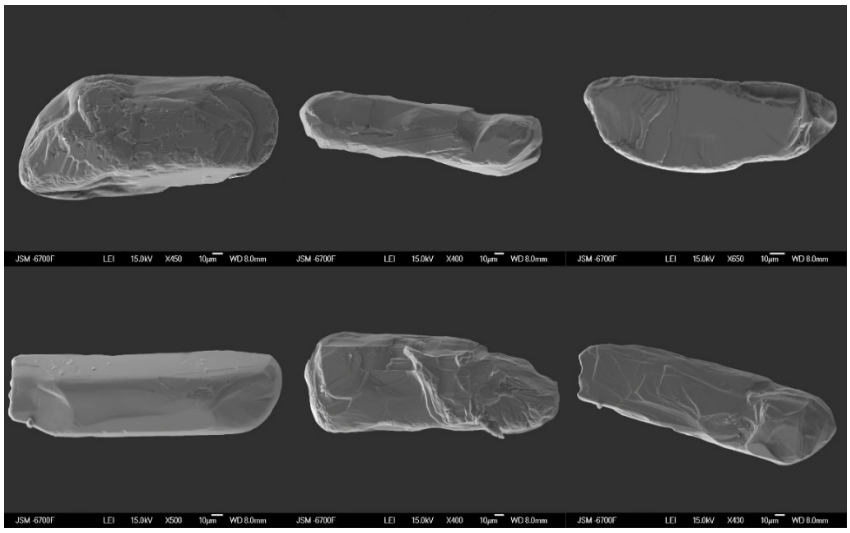


**Fig. 1. Representative rutile crystals of elongated prismatic form**

Significant damage to the crystals during rock crushing and washing on the concentration table prevents a reliable assessment of their morphology. Therefore, for a more comprehensive assessment of its forms and the characteristics of its presence in various minerals, we used data from descriptions of 144 thin sections of the most common varieties of crystalline rocks in the studied area (Tab. 4).

***Table 4***

**Features of rutile occurrence in the crystalline rocks based on petrographic research (frequency of occurrence, %)**

| Rock types | Inclusions of rutile in minerals | | | | Percentage of "large" crystals >0.07 mm |
|---|---|---|---|---|---|
| | Quartz | Biotite | Microcline | Plagioclase | |
| Granites | 26 | 32 | 33 | 0 | 0 |
| Pegmatites | 7 | 5 | 56 | 67 | 0 |
| Gneisses | 20 | 21 | 0 | 0 | 40 |
| Crystalline schists | 4 | 5 | 0 | 0 | 20 |
| Migmatites | 19 | 37 | 11 | 33 | 20 |
| Quartzites and vein quartz | 24 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| All rocks, % | 54 | 19 | 9 | 3 | 16 |

The absolute majority of rutile is in the form of acicular crystals and their intergrowths, which are found mainly in quartz and less in biotite. Rutile inclusions in feldspars are characteristic of rocks of acidic composition: granites, pegmatites, and migmatites. In skarns, rutile is recorded only in two cases: as acicular crystals in scapolite and in dolomite.

Relatively large grains of rutile, up to 0.7 mm, in the form of prisms and irregular crystals, are quite rare and have only been found in rock samples from 10 boreholes. The majority of these boreholes are located in the Pervomaisk area of the Middle Buh region on sections composed of rock formations of the Buh series. This area includes the Kosharo-Oleksandrivka, Mohylne, and Hrushka sites in Pervomaisk area, where rock formations belong to the Buh series. In some thin sections of gneisses and quartzites from these sites, the rutile content typically ranges from 1 to 2 %. In the Kosharo-Oleksandrivka site, dark brown coarse-grained rutile is predominantly found in the garnet-sillimanite-biotite quartzites of the Kosharo-Oleksandrivka suite of the Buh series. In other sites, besides quartzites, rutile has also been identified in garnet-biotite gneisses and migmatites.

According to the petrographic studies, rutile is closely related to the processes of quartzization, greisenization, and chloritization (it is often found in chloritized biotite).

As shown in Table 4, only 16 % of rutile in crystalline rocks is non-acicular and exceeds the dimensions of 0.05–0.07 mm. This allows it to be identified through ordinary mineralogical analysis. In addition, most of the rutile is enclosed within the quartz crystals. As a result, it remains with the quartz in the "waste" during the washing of mineralogical samples. This rutile can be extracted from the quartz shell only in the case of long-term hydrodynamic separation when quartz grains are crushed along microcracks. Such separation occurs, for example, in thoroughly washed fine-grained sands of Neogene titanium-zirconium placers. Consequently, a significant amount of fine rutile goes undetected by mineralogical analysis.

***Chemical composition of rutile***. To study the chemical composition of rutile, we selected samples from the prevalent rock varieties within the southwestern part of the Ukrainian Shield (Fig. 2).

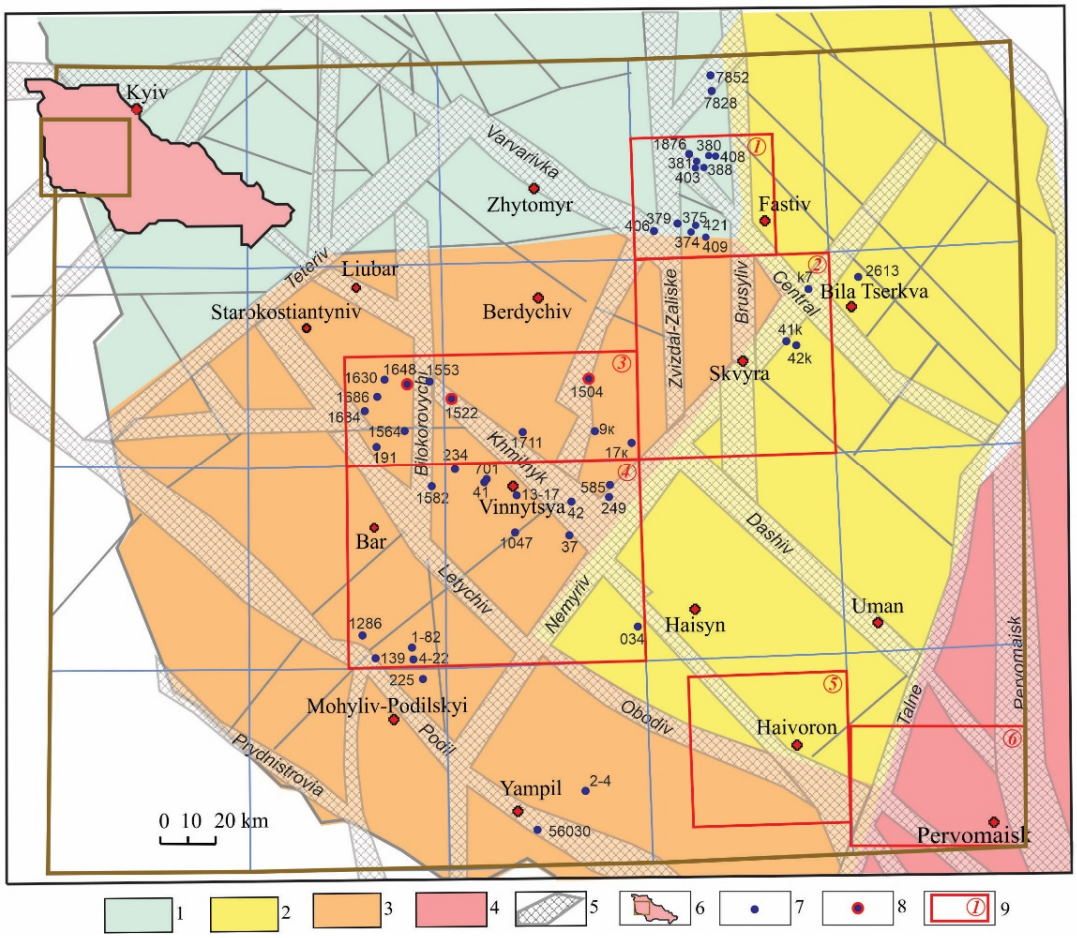



**Fig. 2. The scheme depicting the locations of sample collection points containing rutile.**

*Megablocks*: *1* – Volyn, *2* – Ros-Tikych, *3* – Dnister-Buh; *4* – Holovaniv suture zone, *5* – main and secondary tectonic zones, *6* – rutile study region within the Ukrainian Shield, *7* – sampling points, *8* – rutile with Cr and Nb impurities, *9* – contours of areas: 1 – Fastiv, 2 – Skvyra, 3 – Berdychiv, 4 – Vinnytsia, 5 – Haivoron, 6 – Pervomaisk

In Table 5, we present the average chemical composition of rutile for different rock types of the Dnister-Buh, and Ros-Tikych megablocks, as well as, for comparison, part of the Volyn megablock. Additionally, we used data on the rutile composition from kimberlites and crustal eclogites of the Alps, gathered from literary sources, for comparison (Evdokimov, & Bagdasarov, 1981; Garanin, Kudriavtseva, & Kharkiv, 1980; Gurney et al., 1995; Kaminskiy, 1988; Kvasnytsia, & Vyshnevskyi, 2017; Sobolev et al., 1971; Tollo, & Haggerty, 1987; Zack et al., 2002).

*Table 5*

**Chemical composition of rutile from the crystalline rocks of the southwestern part of the Ukrainian Shield (average/min-max), wt%**

| Rock types | No. of crystals | $TiO_2$ | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | FeO | $Cr_2O_3$ | $V_2O_3$ | $Nb_2O_5$ | $Ta_2O_5$ | $ZrO_2$ | $WO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Volyn megablock, Fastiv area* | | | | | | | | | | | |
| Zhytomyr granites | 13 | 97.28<br>96.2–100 | bdl | bdl | bdl | 0.03<br>bdl–0.4 | 0.75<br>bdl–1.52 | 1.38<br>bdl–2 | bdl | bdl | 0.34<br>bdl–1.14 |
| Pegmatites | 8 | 99.26<br>98.18–100 | bdl | bdl | bdl | bdl | 0.39<br>bdl–1.52 | 0.20<br>bdl–0.84 | bdl | bdl | 0.07<br>bdl–0.56 |
| Garnet-biotite gneisses | 16 | 97.81<br>95–100 | bdl | bdl | 0.04<br>bdl–0.64 | 0.08<br>bdl–0.48 | 0.31<br>bdl–1.44 | 1.50<br>bdl–2.81 | bdl | bdl | 0.15<br>bdl–1.13 |
| Graphite-biotite gneisses | 20 | 98.00<br>93.93–100 | bdl | bdl | 0.13<br>bdl–1.57 | 0.05<br>bdl–0.71 | 0.51<br>bdl–1.77 | 0.98<br>bdl–3.79 | bdl | bdl | 0.16<br>bdl–1.24 |
| Biotite gneisses | 13 | 98.15<br>97.02–99.23 | bdl | bdl | bdl | bdl | 1.09<br>bdl–1.8 | 0.53<br>bdl–1.79 | bdl | bdl | bdl |
| Amphibole gneisses | 6 | 97.71<br>95.39–100 | bdl | bdl | 0.37<br>bdl–2.2 | 0.05<br>bdl–0.3 | 0.95<br>bdl–1.84 | 0.25<br>bdl–0.76 | bdl | 0.19<br>bdl–1.11 | bdl |
| Metasomatites | 6 | 99.21<br>98.76–100 | bdl | bdl | 0.09<br>bdl–0.55 | bdl | 0.32<br>bdl–0.99 | 0.31<br>bdl–1.19 | bdl | bdl | bdl |
| Vein quartz | 11 | 98.85<br>97.24–100 | bdl | bdl | 0.07<br>bdl–0.82 | 0.06<br>bdl–0.61 | 0.42<br>bdl–2.14 | 0.45<br>bdl–1.83 | bdl | bdl | bdl |
| *Dnister-Buh megablock, Vinnytsia area* | | | | | | | | | | | |
| Gabbroids | 19 | 99.09<br>97.48–100 | bdl | bdl | 0.03<br>bdl–0.57 | bdl | 0.42<br>bdl–2.08 | 0.13<br>bdl–1.66 | 0.02<br>bdl–0.37 | 0.12<br>bdl–0.88 | 0.10<br>bdl–0.66 |
| Khmilnyk diabases | 4 | 99.07<br>97.93–100 | bdl | bdl | bdl | bdl | 0.54<br>bdl–0.92 | bdl | bdl | 0.27<br>bdl–1.09 | bdl |
| Basalts, Vendian system | 10 | 98.75<br>96.72–100 | 0.07<br>bdl–0.71 | bdl | bdl | bdl | 0.74<br>bdl–1.82 | 0.15<br>bdl–0.8 | bdl | 0.14<br>bdl–0.79 | bdl |
| Ultrabasites, Zhdanivsky massif | 5 | 99.43<br>98.66–100 | bdl | bdl | 0.14<br>bdl–0.69 | bdl | 0.22<br>bdl–1.1 | 0.16<br>bdl–0.8 | bdl | bdl | bdl |
| Garnet-biotite gneisses | 19 | 98.49<br>94.44–100 | 0.02<br>bdl–0.4 | 0.20<br>bdl–1.05 | 0.06<br>bdl–0.65 | 0.06<br>bdl–0.79 | 0.69<br>bdl–1.62 | 0.33<br>bdl–1.07 | bdl | bdl | 0.04<br>bdl–0.75 |
| Dniester-Buh crystalline schists | 8 | 99.08<br>96.98–100 | 0.05<br>bdl–0.37 | 0.06<br>bdl–0.48 | 0.25<br>bdl–1.96 | 0.05<br>bdl–0.4 | 0.32<br>bdl–0.28 | 0.13<br>bdl–1.07 | bdl | bdl | bdl |
| Diopside-amphibole crystalline schists | 7 | 98.92<br>96.35–100 | 0.15<br>bdl–1.02 | 0.12<br>bdl–0.86 | 0.13<br>bdl–0.91 | bdl | 0.25<br>bdl–0.88 | 0.13<br>bdl–0.93 | bdl | 0.24<br>bdl–1.65 | bdl |
| Berdychiv migmatites | 35 | 97.92<br>92.96–100 | bdl | 0.01<br>bdl–0.43 | 0.04<br>bdl–0.8 | 0.79<br>bdl–1.89 | 0.19<br>bdl–1.21 | 0.90<br>bdl–4.35 | bdl | bdl | 0.08<br>bdl–1.24 |
| Berdychiv granites | 52 | 98.64<br>89–100 | 0.09<br>bdl–1.83 | 0.19<br>bdl–7.29 | 0.13<br>bdl–2.64 | 0.04<br>bdl–1.76 | 0.32<br>bdl–1.38 | 0.42<br>bdl–8.36 | bdl | 0.04<br>bdl–0.96 | 0.02<br>bdl–0.78 |
| Charnockites | 15 | 99.47<br>98.71–100 | bdl | bdl | bdl | bdl | 0.36<br>bdl–1.06 | bdl | bdl | 0.08<br>bdl–1.27 | bdl |
| Enderbites | 22 | 99.06<br>93.83–100 | 0.02<br>bdl–0.44 | 0.08<br>bdl–1.60 | 0.19<br>bdl–1.51 | 0.12<br>bdl–1.9 | 0.26<br>bdl–1.55 | 0.12<br>bdl–1.02 | bdl | 0.07<br>bdl–0.72 | 0.03<br>bdl–0.66 |
| Magnetite quartzites | 2 | 99.01<br>98.74–99.27 | bdl | bdl | 0.37<br>bdl–0.73 | bdl | 0.52<br>bdl–1.04 | bdl | bdl | bdl | bdl |
| Metasomatites | 11 | 99.87<br>99.19–100 | bdl | bdl | 0.06<br>bdl–0.65 | bdl | bdl | 0.07<br>bdl–0.81 | bdl | bdl | bdl |
| *Ros-Tikych megablock, Skvyra area* | | | | | | | | | | | |
| Zvenyhorodka granites | 38 | 98.72<br>93.44–100 | 0.12<br>bdl–4.54 | 0.09<br>bdl–1.69 | 0.13<br>bdl–1.93 | 0.05<br>bdl–1.02 | 0.40<br>bdl–1.71 | 0.25<br>bdl–1.84 | bdl | 0.11<br>bdl–0.91 | 0.06<br>bdl–1.1 |
| Crystalline schists | 22 | 98.71<br>97.49–100 | 0.01<br>bdl–0.31 | bdl | 0.04<br>bdl–0.94 | bdl | 0.80<br>bdl–1.8 | 0.19<br>bdl–1.03 | bdl | bdl | 0.04<br>bdl–0.81 |
| Magnetite quartzites | 1 | 98.93 | bdl | bdl | bdl | bdl | 1.07 | bdl | bdl | bdl | bdl |
| *Data from the literature* | | | | | | | | | | | |
| Kimberlites (ultrabasic) | 118 | 88.43<br>64.3–98.24 | 0.07<br>bdl–0.45 | 0.33<br>bdl–1.75 | 1.70<br>0.07–<br>9.99 | 4.88<br>0.64–<br>9.75 | 0.22<br>bdl–0.98 | 3.58<br>bdl–<br>20.90 | 0.28<br>bdl–1.82 | 0.36<br>bdl–1.46 | n.a. |
| Kimberlites (eclogitic) | 32 | 97.83<br>95.00–99.67 | 0.01<br>bdl–0.08 | 0.43<br>bdl–1.60 | 0.81<br>bdl–3.14 | 0.05<br>bdl–0.20 | 0.03<br>bdl–0.27 | 0.15<br>bdl–1.30 | 0.26<br>bdl–8.06 | 0.03<br>bdl–0.29 | n.a. |
| Crustal eclogites (Alps) | 11 | 99.01<br>96.96–99.99 | 0.03<br>bdl–0.08 | 0.02<br>bdl–0.06 | 0.29<br>bdl–0.44 | 0.44<br>bdl–2.40 | 0.08<br>bdl–0.27 | 0.07<br>bdl–0.23 | >0.01<br>bdl–0.01 | 0.01<br>bdl–0.02 | 0.01<br>bdl–0.04 |

***Note:*** bdl – below detection limit.

As can be seen from the Table, the average content of impurities in rutile varies in a wide range from 0 to 3 %, which is comparable to the average content of impurities in rutile from sedimentary rocks of the territory. Variations in the total content of impurities in rutile are observed depending on its location within different megablocks (Fig. 3). The highest

content was recorded in the rutile of the Volyn megablock (1.53 %), slightly lower (1.15 %) in the rutile of the Ros-Tikych megablock, and the lowest (0.94 %) in the rutile of the Dnister-Buh megablock. This difference in the total impurities content of rutile in crystalline rocks is probably related to the degree of their metamorphism. For instance, the rocks of the Volyn megablock underwent epidote-amphibolite facies metamorphism, those of the Ros-Tikych megablock – amphibolite facies, and those of the Dnister-Buh megablock – granulite facies.

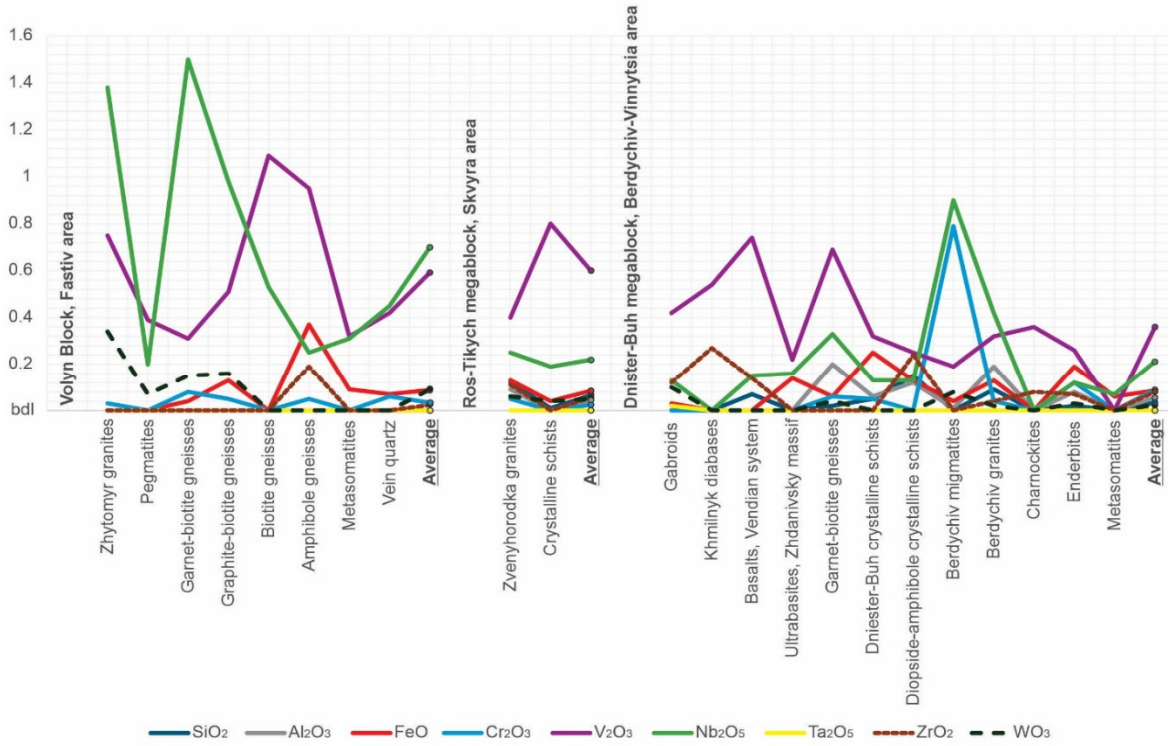



**Fig. 3. Diagram of the fluctuations in the content of impurities in rutile of the crystalline rocks within the megablocks of the southwestern part of the Ukrainian Shield**

Vanadium and niobium are the most commonly occurring impurities, often found at relatively high levels, followed by zirconium, chromium, and iron; other impurities occur in 40–60 % of cases with negligible concentrations (Tab. 6).

***Table 6***

**The most important impurities in rutile from the crystalline rocks**

| Rock types | Complex/series | No. of crystals | Crystals with impurities (as a percentage of the number of grains analyses) | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Without impurities (bdl) | $V_2O_3$ | $Nb_2O_5$ | $Cr_2O_3$ | FeO | $WO_3$ | $ZrO_2$ | $Al_2O_3$ | $SiO_2$ |
| *The northwestern part of the Ukrainian Shield* | | | | | | | | | | | |
| Granites | Zhytomyr | 13 | 7.6 | 61.5 | 92.3 | 0 | 0 | 38.5 | 0 | 0 | 0 |
| Pegmatites | Zhytomyr | 8 | 50 | 37.5 | 25.0 | 0 | 0 | 12.5 | 0 | 0 | 0 |
| Sillimanite gneisses | Teteriv | 49 | 10.2 | 48.9 | 65.3 | 10.2 | 6.1 | 12.2 | 0 | 0 | 0 |
| Amphibole gneisses | Teteriv | 6 | 16.7 | 66.7 | 33.3 | 16.7 | 16.7 | 0 | 16.7 | 0 | 0 |
| Crystalline schists | Ros-Tikych | 22 | 13.6 | 68.2 | 27.3 | 0 | 4.5 | 4.5 | 0 | 0 | 4.5 |
| Vein quartz | Zhytomyr | 11 | 45.5 | 27.3 | 36.4 | 9.1 | 9.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| *The southwestern part of the Ukrainian Shield* | | | | | | | | | | | |
| Gabbroids | Kapitanka-Dereniukha | 19 | 36.8 | 31.6 | 15.8 | 0 | 5.3 | 15.8 | 15.8 | 0 | 0 |
| Diabases | Khmilnyk | 4 | 25.0 | 75.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 25.0 | 0 | 0 |
| Basalts | Vend | 10 | 40.0 | 50.0 | 20.0 | 0 | 0 | 0 | 20.0 | 0 | 10.0 |
| Ultrabasites | Zhdanivka | 5 | 40.0 | 20.0 | 20.0 | 0 | 20.0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gneisses | Dnister-Buh | 19 | 21.0 | 57.9 | 36.8 | 10.5 | 10.5 | 5.3 | 0 | 15.8 | 5.3 |
| Crystalline schists | Dnister-Buh | 8 | 62.5 | 25 | 12.5 | 12.5 | 12.5 | 0 | 0 | 12.5 | 12.5 |
| Diopside-amphibole crystalline schists | Dnister-Buh | 7 | 28.6 | 42.9 | 14.3 | 0 | 14.3 | 0 | 14.3 | 14.3 | 14.3 |
| Migmatites | Berdychiv | 35 | 5.7 | 22.9 | 65.7 | 82.9 | 5.7 | 11.4 | 0 | 2.9 | 0 |
| Granites | Zvenyhorodka | 38 | 36.8 | 36.8 | 26.3 | 5.3 | 10.5 | 7.9 | 13.2 | 5.3 | 2.6 |
| Granites | Berdychiv | 52 | 36.5 | 32.7 | 28.9 | 3.8 | 7.7 | 1.9 | 5.8 | 7.7 | 9.6 |
| Enderbites, Charnokites | Lityn | 37 | 43.2 | 40.5 | 8.1 | 5.4 | 8.1 | 2.7 | 8.1 | 2.7 | 2.7 |
| Magnetite quartzites | Buh | 3 | 0 | 66.7 | 0 | 0 | 33.3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Metasomatites | ? | 17 | 64.7 | 11.8 | 17.7 | 0 | 11.8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| All rocks | | 363 | 29.2 | 40.2 | 35.0 | 12.7 | 7.7 | 7.2 | 5.2 | 3.9 | 3.3 |

Noticeable fluctuations in impurity content among rocks of the same type are observed. This is evident in Proterozoic gneisses of the Dnister-Buh series in the Fastiv area, where fluctuations in vanadium, niobium, and iron content can reach 2–3 times their average. According to our statistical data, among all the gneisses of the southwestern part of the Ukrainian Shield (6499 spectral analyses), the garnet-biotite varieties contain the highest amount of chromium – 150.3 g/t. According to silicate analysis data, these varieties are also among the most magnesian (MgO content, wt%: pyroxene-bearing – 3.71, amphibole-bearing – 3.76, garnet-biotite – 2.97). Therefore, garnet-biotite varieties of gneisses can be considered the most mafic, and thus the most deep-seated. Among the gneisses, only in the rutile of these varieties does niobium prevail over vanadium among the impurities. A significantly smaller range of impurity content fluctuations in rutile is observed in granites. The granites of the Zhytomyr, Zvenyhorodka, and Berdychiv complexes contain impurities in approximately the same range, although the granites of the older and probably deeper Berdychiv complex have higher niobium and aluminum content and lower vanadium content.

A decrease in impurity content is also observed in the rutiles of granites of the Teteriv, Skvyra, and Berdychiv areas compared to the more ancient formations – gneisses. Rutile in subbasic (enderbites), basic (amphibolites, gabbroids, diabases), and ultrabasic rocks contain significantly fewer impurities, including indicators of deep genesis, such as chromium and niobium, compared to acidic rocks. The content of these impurities is much lower than that found in eclogite and ultramafic nodules of kimberlites.

In comparison with rutile from crystalline rocks of the southwestern part of the USh, rutiles from crustal-mantle rocks (eclogites and ultramafic nodules in kimberlites) are characterized by a high content of iron and a low content of vanadium.

***Distribution of impurities and their associations in rutile***. Rutile in various crystalline rocks exhibits a unique array of impurity elements, as detailed in Table 6. Out of 363 rutile crystals analyzed, only 106 (29.2 %) do not contain impurities (their quantity does not exceed the analyzer's sensitivity threshold of 0.01 wt%). Among the rocks of the Dniester-Buh megablock, the highest total impurity content (%) is observed in Berdychiv granites (11.0), followed by migmatites (7.04) and enderbites (6.17). Comparable levels have been found only in the Zvenyhorod granites-migmatites of the Ros-Tikych megablock (6.56 %) and the garnet-biotite gneisses of the Fastiv area (5.00 %). A positive correlation is observed between the average rutile content and the total impurities in rutile in both igneous and metamorphic rocks.

Below is a brief description of the distribution of the most common metal impurities in rutile from various crystalline rocks of the studied area.

*Iron* is detected in a small number of rutile samples (7.7 %); its content is generally insignificant, averaging 0.09 wt%. The maximum average iron content of 0.37 wt% is found in rutile from magnetite quartzites, supporting the thesis regarding the influence of geochemical background on impurity composition.

*Tungsten* is encountered rarely, occurring in only 7.2 % of rutile analyses, except for rutile extracted from granites of the Zhytomyr complex from Fastiv area (38.5 %). These granites contain an elevated amount of apatite and sulfides. The rutile of these granites contains from 0 to 1.14 wt% tungsten, with an average of 0.34 wt%. Tungsten is closely associated with vanadium and niobium. The association of these metals is natural, as the granites belong to the Bystriv association of rare-metal granites common in the area of the Teteriv depression (Dovgan et al., 1982).

*Zirconium* is detected in 19 out of 363 analyses (5.2 %). This impurity is mainly enriched in the rutiles of the Dnister-Buh megablock: granites, migmatites, charnockites, and enderbites of the Berdychiv complex. In four rutile grains from these rocks, the zirconium content exceeds 1 wt%.

*Vanadium* is the most common impurity in rutile, occurring in 40.2 % of rutile analyses. In the southern part of the territory, vanadium appears as a single impurity in rutile, while in the northern part, in both granites and gneisses, it typically occurs in association with other metals, most often with niobium and iron. This information can be used to establish the likely genesis of rutiles from sedimentary rocks.

*Niobium* is the second most common impurity in rutile (35 %). It is exceedingly rare in enderbites and charnockites and absent in rutiles of magnetite quartzites and Khmilnyk diabases. Generally, it is more prevalent in rutiles of crystalline rocks in the northwestern part of the Ukrainian Shield. The highest niobium content (on average) is found in rutile of garnet-biotite gneisses and granites of the Zhytomyr complex in the Fastiv area (1.95 wt% and 1.38 wt%, respectively). Slightly lower concentrations are recorded in rutile of gneisses of the Teteriv series in the same area, at 0.98 wt%. Albite-muscovite pegmatites and greisenized granites with tantalum-columbite are widespread in the Fastiv area, in the region of the Teteriv paleo-threshold, and the Brusyliv suture zone (Dovgan et al., 1982). This fact explains the increased geochemical "background" of niobium in this region.

In the rutile from rocks of the southern part of territory, niobium is mainly found as a single impurity and occurs most often in migmatites, gneisses and granites. In the vast majority of rock types, niobium is found in association with vanadium, sometimes additionally with iron. The Nb–V–(±Fe) association is most prevalent in Zhytomyr granites (comprising 61.5 % of all impurities) and Teteriv gneisses (29.3 %) – the predominant rock varieties in the northern part of the region. In other rock types, this association typically does not exceed 19 %. The Nb–Cr association is found exclusively in rutile of the Berdychiv area, in samples of migmatized basic rocks of probably deep origin.

*Chromium* is the third most common impurity in rutile, occurring in 46 analyses (12.7 %). However, 29 of them are analyses of rutile from 3 samples of migmatites with inclusions of rocks of the basic composition from Berdychiv area. If these are excluded from the statistics, the occurrence of chromium will decrease to 17 cases, amounting to 5.1 %. At the same time, chromium impurities are absent in the rutile of basites-ultrabasites, which may indicate their shallow (crustal) origin. Chromium alone was determined in only 9 analyses of rutile. In other cases, it is found in Cr–Nb associations (most often), as well as Cr–Fe, Cr–Nb–V, Cr–Nb–Fe associations. Regarding the Berdychiv migmatized basites, a deep Cr–Nb association clearly prevails in their rutile.

Tab. 7 below shows the values of the maximum content of impurity elements in rutile from the crystalline rocks of the territory.

As seen from the Tab. 7, only the maximum niobium oxide content exceeds 3 wt%. Other impurities are observed within the range of 0.7–2.64 wt%. Tungsten is found in rutile of subcarbonate rocks with signs of skarn development (presence of diopside, scapolite), while chromium is detected in migmatites of the Berdychiv area, which contain relicts of basites with chromium spinelides.

*Table 7*

**The maximum content of impurity elements in rutile from the crystalline rocks of the western part of the Ukrainian Shield**

| Max. content of impurities, wt% | Sample No. | Rock types | Area | Other impurities, wt% |
|---|---|---|---|---|
| $V_2O_3$ – 2.14 | 375-72 | Vein quartz | Fastiv | – |
| $V_2O_3$ – 2.08 | 249-5 | Gabbro-amphibolite | Vinnytsia | – |
| $Nb_2O_5$ – 8.36 | 1286 | Garnet-biotite granite | Vinnytsia | FeO — 2.64 |
| $Nb_2O_5$ – 4.35 | 1504-7 | Garnet-hornblende migmatite | Berdychiv | $Cr_2O_3$ – 1.89, FeO – 0.8 |
| $Nb_2O_5$ – 3.79 | 421-33 | Sillimanite-graphite-biotite gneiss | Fastiv | $V_2O_3$ – 1.04, FeO – 0.96 |
| $Cr_2O_3$ – 1.90 | 1047-4 | Hypersthene-garnet-biotite enderbite | Vinnytsia | FeO – 1,51, ZrO – 0.72 $Al_2O_3$ – 1.6, $SiO_2$ – 0.44 |
| $Cr_2O_3$ — 1.89 | 1504-7 | Garnet-hornblende migmatite | Berdychiv | $Nb_2O_5$ – 4.35, FeO – 0.8 |
| $Cr_2O_3$ — 1.78 | 1630-9 | Hornblende migmatite | Berdychiv | – |
| FeO — 2.64 | 1286 | Garnet-biotite granite | Vinnytsia | $Nb_2O_5$ – 8.36 |
| FeO — 2.20 | 378-25 | Hypersthene- hornblende-biotite gneiss | Fastiv | $Nb_2O_5$ – 0.71 |
| $WO_3$ — 1.24 | 421-33 | Sillimanite-graphite-biotite gneiss | Fastiv | $V_2O_3$ – 1.11, $Nb_2O_5$ – 1.91 FeO – 1.57 |
| $WO_3$ — 1.24 | 1504-7 | Garnet-hornblende migmatite | Berdychiv | $Cr_2O_3$ – 0.88, $Nb_2O_5$ – 0.46, FeO – 0.72 |
| $ZrO_2$ — 1.65 | 1630-11 | Diopside gneiss | Berdychiv | $V_2O_3$ – 0.88, $Nb_2O_5$ – 0.93 |
| $ZrO_2$ — 1.27 | 1686-6 | Charnockite with diopside | Vinnytsia | — |
| $ZrO_2$ — 1.11 | 406-66 | Amphibole-scapolite gneiss | Fastiv | — |

## Discussion and conclusions

Rutile is a widespread mineral found in almost all types of crystalline rocks within the southwestern part of the Ukrainian Shield and its surrounding areas. However, it is less abundant compared to other titanium-bearing minerals such as ilmenite and titanite. The average rutile content ranges from 0.8 g/t in enderbites to 36.8 g/t in gneisses, reaching up to 4912.7 g/t in diabases. The vast majority of rutile exhibits black (68.2 %) or dark brown (18.4 %) coloration. The size of rutile grains predominantly varies between 0.05 and 0.3 mm. Most rutile occurs as acicular crystal inclusions and their intergrowths, primarily within quartz and, to a lesser extent, in biotite. Relatively large grains of rutile, in the form of prisms and irregularly shaped crystals, are commonly distributed within feldspars and biotite.

The majority of analyzed rutile samples (72 %) contain impurities of various metals. The average impurity content in rutile from different rocks ranges from 0 to 3 wt%. Impurities in rutile from sedimentary and crystalline rocks of the southwestern part of the Ukrainian Shield are similar in both composition and average content, which indicates their genetic relationship.

Petrographic studies indicate that rutile is closely associated with processes such as silicification, greisenization, and chloritization. Consequently, rutile may form during at least three stages: magmatic, metamorphic (granitization), and low-temperature diaphthoresis. To confirm this hypothesis, absolute age determination of rutile needs to be conducted. A correlation is observed between the total impurity content in rutile and the degree of metamorphism of the host rocks. Rutile appears to be progressively purified from impurities as the grade of regional metamorphism increases.

Based on average content, the predominant impurities in rutile are vanadium, niobium, chromium, and iron. In the southern part of the region, vanadium is a single impurity in rutile, primarily from basic-ultrabasic rocks. In contrast, in the northern part, vanadium is typically found in association with other metals, most frequently niobium and iron, in both granites and gneisses. This pattern can be utilized to infer the probable genesis of rutiles from sedimentary rocks.

The Nb–Cr association is found exclusively in rutile from three boreholes in migmatized metabasites of probable deep origin, located within the Berdychiv area. Rutiles with this impurity association are promising for identifying diamond-bearing rocks. Chromium is absent in rutile from the gabbroids and ultrabasic rocks studied in the area, which may indicate their relatively shallow formation depth.

Rutile from rare-metal (niobium, tantalum, tungsten, molybdenum) – enriched crystalline rocks (niobium, tantalum, tungsten, molybdenum) of the Fastiv area contains impurities of these metals. Such rutile may have industrial significance, and its content should be considered during the exploration of Neogene titanium-zirconium placers located in the Fastiv area.

The highest average FeO content (0.37 wt%) has been detected in rutile from magnetite quartzites. This indicates that rutile accumulates and preserves information about the origin and metallogenic specialization of its host rocks. Impurities of iron, chromium, vanadium, niobium, and zirconium in rutile can be effectively utilized to identify the primary sources of rutile in sedimentary rocks and valuable mineral placers.

**Authors' contribution:** Oleksandra Pavliuk – conceptualization, methodology, analytics, rutile description, data analysis, map creation; Viacheslav Pavliuk – collection and analysis of archival data, map creation, data analysis; Oleh Semeniv – data validation, data analysis and processing, software, formal analysis.

**Sources of funding.** The study was carried out under a departmental project of the NAS of Ukraine (project No. 0123U100651).

**References**

Baldwin, J. A., & Brown, M. (2008). Age and duration of ultrahigh-temperature metamorphism in the Anapolis-Itaucu Complex, Southern Brasilia Belt, central Brasil – constraints from U-Pb geochronology, mineral rare earth element chemistry and trace-element thermometry. *Journal of Metamorphic Geology*, 26(2), 213–233. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00759.x

Banfield, J. F., & Veblen, D. R. (1991). The structure and origin of Fe-bearing defects in metamorphic rutile. *American Mineralogist*, 76(1–2), 113–127.

Bangaku Naidu, K., Reddy, K. S. N., Ravi Sekhar, C., Ganapati Rao, P., & Murali Krishna, K. N. (2019). Rutile mineral chemistry as a guide to provenance of red sediments and modern sands of Bhimunipatnam–Konada Coast, Andhra Pradesh, East Coast of India. *National Academy Science Letters*, 43(2), 145–152. https://doi.org/10.1007/s40009-019-00819-9

Dovgan, R. N., et al. (1989). *Geological structure and minerals of the Zavallia region. Report of geological survey team No. 6 on deep geological mapping of scale 1:50,000 of sheet M-35-144-B together with geological survey of sheet M-35-132-G with general searches for 1986–1989*. Geoinform [in Russian]. [Довгань, Р. Н., и др. (1989). *Геологическое строение и полезные ископаемые Завальевского района. Отчет геологосъемочного отряда № 6 о глубинном геологическом картировании м-ба 1:50 000 листа М-35-144-Б совместно с геологической съемкой листа М-35-132-Г с общими поисками за 1986–1989 гг.* Геоинформ].

Dovgan, R. N., Baranova, E. I., Rozhdestvenskaya, V. I. et al. (1985). *Report on deep geological mapping within the southern part of the Kocheriv zone (sheets M-35-71-B, G) for 1982–1985*. Geoinform [in Russian]. [Довгань, Р. Н., Баранова, Е. И., Рождественская, В. И. и др. (1985). *Отчет*

*о глубинном геологическом картировании в пределах южной части Кочеровской зоны (листы М-35-71-Б, Г) за 1982–1985 гг.* Геоинформ].

Dovgan, R. N., Bespalaya, E. L., Lypkina-Kuchinskaya, N. E., Pavlyuk, V. N., et al. (1982). *Report on deep geological mapping on a scale of 1:50,000 within the Kocherov zone (sheets M-35-59B, V, G; M-35-71A) for 1976–1982*. Geoinform [in Russian]. [Довгань, Р. Н., Беспалая, Е. Л., Липкина-Кучинская, Н. Е., Павлюк, В. Н. и др. (1982). *Отчет о глубинном геологическом картировании м-ба 1:50 000 в пределах Кочеровской зоны (листы М-35-59Б, В, Г; М-35-71А) за 1976–1982 гг.* Геоинформ].

Evdokimov, A. N., & Bagdasarov, E. A. (1981). Associations and formation sequence of chromium, titanium, and iron oxides in kimberlites and picritic porphyrites of the Kounam district (Yakutia). *Notes All-Union Mineralogical Society*, 110(2), 204–212 [in Russian]. [Евдокимов, А. Н., & Багдасаров, Э. А. (1981). Ассоциации и последовательность образования окислов хрома, титана и железа в кимберлитах и пикритовых порфиритах Коунамского района (Якутия). *Записки Всесоюзного минералогического общества*, 110(2), 204–212].

Foley, S. F., Barth, M. G., & Jenner, G. A. (2000). Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *64*(6), 933–938. https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00355-5

Garanin, V. K., Kudriavtseva, H. P., & Kharkiv, A. D. (1980). On the mineralogy and genesis of ilmenite-bearing lherzolites from the Udachnaya kimberlite pipe. *Notes All-Union Mineralogical Society*, 109(6), 687–694 [in Russian]. [Гаранин, В. К., Кудрявцева, Г. П., & Харькив, А. Д. (1980). К минералогии и генезису ильменитсодержащих лерцолитов из кимберлитов трубки "Удачная". *Записки Всесоюзного минералогического общества*, 109(6), 687–694].

Gurney, J. J., Harris, J. W., Otter, M. L., & Rickard, R. S. (1995, August). *Jwaneng diamond inclusions*. Paper presented at the 6th International Kimberlite Conference, Novosibirsk, Russia. https://doi.org/10.29173/ikc1836

Kaminskiy, F. V. (1988). *Kimberlites and diamonds of the People's Republic of China*. VIEMS [in Russian]. [Каминский, Ф. В. (1988). *Кимберлиты и алмазы Китайской Народной Республики*. ВИЭМС].

Kulyk, S. N. (1996). *Geological structure and minerals of the river basin. Rastavitsa and Kamenka. Results of geological survey (sheets M-35-84-B, D) and additional geological study (sheets M-35-84-A, B) on a scale of 1:50 000 (Skvyra region) for 1991–1996*. Geoinform [in Russian]. [Кулик, С. Н. (1996). *Геологическое строение и полезные ископаемые басейна рр. Ставица и Каменка. Результаты геологической съемки (листы М-35-84-Б, Г) и геологического доизучения (листы М-35-84-А, В) м-ба 1 : 50000 (Сквирский р-н) за 1991–1996 гг.* Геоинформ].

Kvasnytsia, V. M., & Vyshnevskyi, O. A. (2017). Rutile intergrowths with diamond from the Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia). *Mineralogical Journal (Ukraine)*, 39(3), 17–31. https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.03.017 [in Ukrainian]. [Квасниця, В. М., & Вишневський, О. А. (2017). Зростки рутилу з алмазом із кімберлітів трубки "Удачная" (Якутія). *Мінералогічний журнал*, 39(3), 17–31].

Luvizotto, G. L., & Zack, T. (2009). Nb and Zr behavior in rutile during high-grade metamorphism and retrogression: an example from the Ivrea Verbano Zone. *Chemical Geology*, 261(3–4), 303–317. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.07.023

Lyashko, N. A., Vasilenko, N. S., Germanov, B. S. et al. (1986). *Report on the results of deep geological mapping at a scale of 1:50 000 of the southern part of the Khmelnytskyi zone. Sheets M-35-105-A-b, g, M-35-105-B-a, M-35-106-V, M-35-106-G-v (Vinnytsia region)*. Production Geological Organization "Sevukrgeologiya", Geoinform [in Russian]. [Ляшко, Н. А., Василенко, Н. С., Германов, Б. С. и др. (1986). *Отчет о результатах глубинного геологического картирования м-ба 1:50 000 южной части Хмельникской зоны. Листы М-35-105-А-б, г, М-35-105-Б-а, М-35-106-В, М-35-106-Г-в (Винницкая обл.)*. ПГО "Севукргеология", Геоинформ].

Malkov, B. A. (2008). Rutile in diamond as a mineralogical barometer for diamondiferous eclogites. In *The world of minerals, crystals and nanostructures* (pp. 79–85). Geoprint [in Russian]. [Мальков, Б. А. (2008). "Рутил в алмазе" – минералогический барометр для алмазоносных эклогитов. В *Мир минералов, кристаллов и наноструктур* (с. 79–85). Геопринт].

Meinhold, G. (2010). Rutile and its applications in Earth sciences. *Earth-Science Reviews*, 102(1–2), 1–28. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.001

Meinhold, G., Anders, B., Kostopoulos, D., & Reischmann, T. (2008). Rutile chemistry and thermometry as provenance indicator: an example from Chios Island, Greece. *Sedimentary Geology*, 203(1–2), 98–111. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.11.004

Pavliuk, O. V. (2019a). Rutile from Neogene titanium-zirconium placers of the southwestern part of the Ukrainian Shield. In *Proceedings of the Scientific Conference dedicated 50th anniversary of M. P. Semenenko IGMOF NAS Ukraine* (Vol. 1, pp. 196–198). IGMOF NAS Ukraine [in Ukrainian]. [Павлюк, О. В. (2019a). Рутил із неогенових титан-цирконієвих розсипів південно-західної частини УЩ. У *Збірник тез наукової конференції, присвяченої 50-річчю ІГМР ім. М. П. Семененка НАН України* (Т. 1, С. 196–198). ІГМР НАН України].

Pavliuk, O. V. (2019b). Rutile from the Tarasivka Neogene titanium-zirconium placer. In *Proceedings of the Scientific Conference dedicated 50th anniversary of M. P. Semenenko IGMOF NAS Ukraine* (Vol. 1, pp. 198–200). IGMOF NAS Ukraine [in Ukrainian]. [Павлюк, О. В. (2019b). Рутил із Тарасівського неогенового титан-цирконієвого розсипу. У *Збірник тез наукової конференції, присвяченої 50-річчю ІГМР ім. М. П. Семененка НАН України* (Т. 1, с. 198–200). ІГМР НАН України].

Pavliuk, O. V., & Pavliuk, V. M. (2018). Rutile from the Zelenyi Yar Neogene placer. In *Geology and Mineral Resources of Ukraine: Collection of theses of the scientific conference to 100th anniversary of NAS and Ukrainian Geological Survey* (pp. 179–180) [in Ukrainian]. [Павлюк, О. В., & Павлюк, В. М. (2018). Рутил із Зеленоярського неогенового розсипу. У *Геологія і корисні копалини України: Збірник тез наукової конференції, присвяченої 100-річному ювілею Нац. акад. наук. України та Держ. служби геології та надр України* (с. 179–180)].

Preston, R. J., Hartley, A. J., Mange-Rajetzky, M., Hole, M. J., May, G., Buck, S., & Vaughn, L. (2002). The provenance of Triassic continental sandstones from the Beryl Fields, northern North Sea: mineralogical, geochemical and sedimentological constraints. *Journal of Sedimentary Research*, 72(1), 18–29. https://doi.org/10.1306/042201720018

Rudnick, R. L., Barth, M., Horn, I., & McDonough, W. F. (2000). Rutile-bearing refractory eclogites: missing link between continents and depleted mantle. *Science*, 287(5451), 278–281. https://doi.org/10.1126/science.287.5451.278

Slynko, P. I., & Bondar, I. I. (1972). *Report on the results of structural drilling along the Brusilovsky (Vilna-Vodotyevsky) profile within the Korostyshevsky district of the Zhitomir region for 1967–1972*. Right Bank Geological Expedition, Geoinform [in Russian]. [Слынько, П. И., & Бондар, И. И. (1972). *Отчет о результатах структурного бурения по линии Брусиловського (Виленско-Водотыевского) профиля в пределах Коростышевского р-на Житомирской обл. за 1967–1972 гг.* Правобережная геолог. экспедиция, Геоинформ].

Sobolev, N. B., Botkunov, A. I., Lavrentyev, Yu. H., & Pospelova, L. N. (1971). Compositional features of minerals associated with diamonds from the Mir kimberlite pipe (Yakutia). *Notes All-Union Mineralogical Society*, 100(5), 558–564 [in Russian]. [Соболев, Н. В., Боткунов, А. И., Лаврентьев, Ю. Г., & Поспелова, Л. Н. (1971). Особенности состава минералов ассоциирующих с алмазами из трубки "Мир" (Якутия). *Записки Всесоюзного минералогического общества*, 100(5), 558–564].

Tollo, R. P., & Haggerty, S. E. (1987). Nb-Cr-rutile in the Orapa kimberlite, Botswana. *Canadian Mineralogist*, 25(2), 251–264.

Tomkins, H. S., Powell, R., & Ellis, D. J. (2007). The pressure dependence of the zirconium-in-rutile thermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(7), 703–713. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00724.x

Triebold, S., von Eynatten, H., & Zack, T. (2012). A recipe for the use of rutile in sedimentary provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 282, 268–275. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.09.008

Tsymbal, S. M., Shumlyanskyy, L. V., & Tsymbal, Yu. S. (2018). Geochemistry and age of detrital rutile from diamondiferous conglomerates and sandstones of the Bilokorovychi Suite (North-Western region of the Ukrainian Shield). *Geochemistry and Ore Formation*, 39, 66–77. https://doi.org/10.15407/gof.2018.39.066 [in Ukrainian]. [Цимбал, С. М., Шумлянський, Л. В., & Цимбал, Ю. С. (2018). Геохімічні особливості та вік кластогенних рутилів із алмазоносних конгломератів і пісковиків білокоровицької світи (північно-західна частина Українського щита). *Геохімія та рудоутворення*, 39, 66–77].

Tsymbal, Yu. S. (2014). *Typomorphism of diamond and its companion minerals from sedimentary rocks of the western part of the Ukrainian Shield*. Naukova dumka [in Ukrainian]. [Цимбал, Ю. С. (2014). *Типоморфізм алмазу та його мінералів-супутників з осадових порід західної частини Українського щита*. Наукова думка].

Vyshnevskyi, O. A. (2023). Rutile from sedimentary deposits of the Middle Bug area: provenance and prospecting area. In *Proceedings of the All-Ukrainian conference "From mineralogy and geognosy to geochemistry, petrology, geology and geophysics: fundamental and applied trends of the 21st century" (MinGeoIntegration XXI)* (pp. 111–114). Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian]. [Вишневський, О. А. (2023). Рутил з теригенних відкладів Середнього Побужжя: походження та пошукове значення. У *Збірник праць Всеукраїнської конференції "Від мінералогії і геогнозії до геохімії, петрології, геології та геофізики: фундаментальні і прикладні тренди XXI ст." (MinGeoIntegration XXI)* (с. 111–114). Київський національний університет імені Тараса Шевченка.]

Watson, E. B., Wark, D. A., & Thomas, J. B. (2006). Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151(4), 413–433. https://doi.org/10.1007/s00410-006-0068-5

Xiao, Y., Sun, W., Hoefs, J., Simon, K., Zhang, Z., Li, S., & Hofmann, A. W. (2006). Making continental crust through slab melting: Constraints from niobium-tantalum fractionation in UHP metamorphic rutile. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(19), 4770–4782. https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.07.010

Yangicher, N. N., et al. (1982). *Report on detailed exploration of the Zavallivske graphite deposit in the Haivoron district of the Kirovograd region of the Ukrainian SSR for 1971–1982 with calculation of reserves as of 01/01/1982*. Geoinform [in Russian]. [Янгичер, Н. Н. и др. (1982). *Отчет о детальной разведке Завальевского месторождения графита в Гайворонском районе Кировоградской области УССР за 1971–1982 гг. с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.1982 г.* Геоинформ].

Zabiyaka, L. I., Germanov, B. S., Vasilenko, N. S., et al. (1974). *Report on the results of complex geological and geophysical research on deep geological mapping of sheet M-35-XXIII (Berdychiv) scale 1:200 000*. Right Bank Geological Expedition, Geoinform [in Russian]. [Забияка, Л. И., Германов, Б. С., Василенко, Н. С. и др. (1974). *Отчет о результатах комплексных геолого-геофизических исследований по глубинному геологическому картированию листа М-35-XXIII (Бердичев) м-ба 1:200 000*. Правобережная ГРЭ, Геоинформ].

Zack, T., Kronz, A., Foley, S. F., & Rivers, T. (2002). Trace element abundances in rutiles from eclogites and associated garnet mica schists. *Chemical Geology*, 184(1–2), 97–122. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(01)00357-6

Zack, T., Moraes, R., & Kronz, A. (2004). Temperature dependence of Zr in rutile: empirical calibration of a rutile thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4), 471–488. https://doi.org/10.1007/s00410-004-0617-8

Zack, T., Strockli, D. F., Luvizotto, G. L., Barth, M., Belousova, E., Wolfe, M. R., & Hinton, R. W. (2011). In situ U–Pb rutile dating by LA-ICP-MS: $^{208}$Pb correction and prospects for geological applications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 162(3), 515–530. https://doi.org/10.1007/s00410-011-0609-4

**Отримано редакцією журналу / Received: 06.07.25**
**Прорецензовано / Revised: 20.09.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Олександра ПАВЛЮК, канд. геол. наук**
**ORCID ID: 0000-0001-5234-2908**
**e-mail: alia.pavliuk@gmail.com**
**Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна**

**В'ячеслав ПАВЛЮК**
**ORCID ID: 0000-0002-7035-8505**
**e-mail: v-pavlyuk@ukr.net**
**Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна**

**Олег СЕМЕНІВ, канд. техн. наук**
**ORCID ID: 0000-0002-4286-5876**
**e-mail: olegsemeniv@gmail.com**
**Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна**

# РУТИЛ ІЗ КОРІННИХ ПОРІД ПІВДЕННО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА

**В с т у п .** ***Рутил – поширений акцесорний мінерал у кристалічних породах Українського щита. Він вирізняється геохімічною стабільністю та здатністю включати такі елементи, як Nb, Fe, V, Zr, Al, а також широкий спектр інших елементів домішок. Метою цього дослідження є аналіз кольору, морфології та хімічного складу рутилу з корінних кристалічних порід південно-західної частини Українського щита з метою виявлення діагностичних ознак, які характерні для різних породних різновидів, а також для можливості стратиграфічних реконструкцій і відстеження міграції теригенного рутилу.***

**М е т о д и .** ***Дослідження базується на аналізі 363 кристалів рутилу, виділених із 57 шліхових проб р, а також текстових архівних матеріалах 11 геологічних зйомок Правобережної геологічної експедиції, проведених у 1972–2009 роках. Зразки репрезентують рутил з різних літотипів: гранітів, гнейсів, пегматитів, ендербітів, ультрабазитів та інших порід південно-західної частини Українського щита. Для вивчення морфології та хімічного складу використовували бінокулярну мікроскопію та аналіз SEM-EDS.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***Вміст рутилу коливається від 0,8 г/т в ендербітах до 109,4 г/т у силіманіт-біотитових гнейсах. Більшість кристалів – чорні або темно-коричневі, голчастої форми, часто включені в кварц або біотит. Переважна частина зразків рутилу (72 %) містить домішки, серед яких найпоширенішими є V, Nb, Cr і Fe. Характер домішок варіює залежно від типу породи, ступеня метаморфізму та регіонального положення. Для північних порід (наприклад, район Фастова) характерні асоціації Nb–V–Fe, тоді як у південних зразках переважає ізольований V. Рутил із вмістом хрому виявлено у мігматизованих метабазитах Бердичівського району.***

**В и с н о в к и .** ***Рутил зберігає геохімічний "відбиток" порід-хазяїнів і відображає як літологічні, так і метаморфічні умови. Він може слугувати надійним індикаторним мінералом для реконструкції джерел осадового рутилу, а асоціації домішок Nb–Cr – для виявлення джерел потенційно алмазоносних порід.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***рутил, південно-західна частина Українського щита, кристалічні породи, хімічний склад.***

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

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

# ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

UDC 504.056+542.2
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.06

Oleksandr BONCHKOVSKYI[1,2], PhD, Researcher
ORCID ID: 0000-0003-1872-4552
e-mail: geobos2013@gmail.com

Pavlo OSTAPENKO[1,4], PhD (Geogr.), Doctoral Student
ORCID ID: 0000-0002-2656-7377
e-mail: ostapenkopavlo@gmail.com

Yaroslava ZHUKOVA[3], PhD (Biol.)
ORCID ID: 0000-0002-2755-5431
e-mail: yaf_z@ukr.net

Illia KRAVCHUK[1,4], PhD Student
ORCID ID: 0000-0001-5247-7255
e-mail: elijah.kravchuk@gmail.com

Serhii PETRYSHCHENKO[3], Researcher
ORCID ID: 0009-0004-4168-969X
e-mail: sergijps@ukr.net

Adelina LAZARETS[1], Master
ORCID ID: 0009-0007-5298-7707
e-mail: adelinalazarets@gmail.com

Oleksandr HALAHAN[4], PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-1449-3638
e-mail: geolab@ukr.net

Nazar STEPANENKO[3], Master's Student,
ORCID ID: 0009-0005-6641-5887
e-mail: nazar2067@gmail.com

[1]NGO "Ukrainian Researchers Society", Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Geography of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]State institution of Soil protection of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[4]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

# WAR-INDUCED SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS: RESULTS FROM A TEST SITE IN MYKOLAIV REGION

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук Ксенією БОНДАР*)

**Background.** *The war in Ukraine is having a serious impact on the physical, chemical and biological properties of soils. Chemical contamination of soil in combat zones is the most discussed issue, as the detonation of various types of weapons releases a range of pollutants into the soil, among which heavy metals are one of the most toxic. Despite the fact that heavy metals are not the main pollutants, they are most often discussed in the literature. Based on a large number of publications, opposing opinions have been formed regarding the level of heavy metal contamination.*

**Methods.** *The content of heavy metals within a study site of 2000 m$^2$ (Stepova Dolyna village) was measured by portable X-ray fluorescence system. In order to identify the precision of XRF analysis, the heavy metals content (Cd, Zn, Pb, Cu, As) was determined using atomic-absorption spectrometry (ContrA 800 D).*

**Results.** *A study of the lateral variability of the content of various heavy metals at a test site in Mykolaiv region, which was heavily damaged by artillery shelling in 2022, found virtually no heavy metal contamination in the soil (except for cadmium in one sample). In most cases, the content of the heavy metals is not mostly related to the location of craters, except for lead, which showed increased concentrations near craters. The very good agreement between portable XRF analyser and atomic-absorption spectrometry was found for lead content. Due to low concentrations of copper, cadmium and arsenic in the soil, the XRF analyser could not measure them.*

**Conclusions.** *At the study site, the soil contamination with heavy metals due to explosion of artillery shells, MLRS and mortar is slight. There is no traceable enrichment with heavy metals near craters that can indicate drawbacks of taking incremental samples in case of high-resolution studies. The use of a portable XRF analyser allows for rapid screening of the war-damaged soils for heavy metals and the identification of heavy metal contamination sites. However, accurate data on heavy metals contamination require more precise laboratory methods.*

**Keywords:** *Russia-Ukraine war, soil, heavy metals, contamination, portable X-ray fluorescence system, atomic- absorption spectrometry.*

## Background

Warfare impacts the physical, chemical and biological soil properties (Pereira et al., 2022). The detonation of ammunition leads to soil contamination with various substances: explosives and their derivatives, heavy metals, polycyclic aromatic hydrocarbons, propellants etc. (Broomandi et al., 2020). The effect of this pollution tends to be the long-lasting as evidenced by results from the battlefields of the World Wars (Bausinger, Bonnaire, & Preuss, 2007; Meerschman et al., 2011; Williams, & Rintoul-

© Bonchkovskyi Oleksandr, Ostapenko Pavlo, Zhukova Yaroslava, Kravchuk Illia , Petryshchenko Serhii, Lazarets Adelina, Halahan Oleksandr, Stepanenko Nazar, 2025

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

Hynes, 2022). As a result, the need for specific management of the affected areas arises (Meaza et al., 2024).

Since 24th February 2022, the Russian invasion of Ukraine has already resulted in widespread soil damage (Baliuk et al., 2024; Solokha et al., 2023;), contributing to the problem of global food security (Dent et al., 2022). The war-induced soil disturbances in Ukraine has been discussed in many publications, with military-associated soil contamination being the most highlighted issue (Biyashev et al., 2024; Bonchkovskyi et al., 2025; Bondar et al., 2025; Datsko et al., 2025; Dmytrenko et al., 2023; Korsun et al., 2024; Menshov et al., 2024; Shebanina et al., 2024; Smirnova et al., 2024; Solokha et al., 2022, 2024; Splodytel et al., 2023; Tonkha et al., 2025; Zaitsev et al., 2022). However, despite the numerous publications, the war-induced soil contamination remains insufficiently discussed. Furthermore, the findings of different research groups contradict each other, as some report critical levels of contamination, whereas others claim minimal contamination. The main focus of Ukrainian research groups today is on heavy metals, since there are almost no facilities in Ukraine to study explosives, which are assumed to be the main contaminants.

Compared to other regions of Ukraine, southern Ukraine is rather poorly studied in terms of war-related soil contamination. Particularly, Splodytel (2023) reported high concentrations of trace metals in craters, suggesting critical contamination with heavy metals of the soil. Tonkha et al. (2025) demonstrated heavy metal contamination in fighting positions, notably in those containing metal fragments. Bulba et al. (2024) showed significant soil pollution with heavy metals in three southern Ukrainian regions.

Thus, this paper aims: 1) to present new results on soil contamination with heavy metals at a test site of the war-affected soils in the Mykolaiv region; 2) to discuss the possibility of using a portable X-ray fluorescence (XRF) analyser for rapid investigation of contaminated soils by comparing the results obtained by the analyser and an atomic-absorption spectrometer (AAS).

**Methods**

***Study site.*** In January 2025, a test site was established at the Stepova Dolyna village of the Halytsynivska territorial hromada in Mykolaiv Oblast (Fig. 1) to collect samples for geochemical analyses and for subsequent monitoring of the recovery of the damaged soil's physical and chemical state. The test site of 2000 m$^2$ is situated on a household plot in the Stepova Dolyna village, which has not been cultivated since 2022. The study area is characterised by considerable soil physical disturbance, since the frontline was located here in 2022, and the fighting was particularly intense. Furthermore, this area is supposed to contain landmines and unexploded ordnance (UXO).

The study site is in the dry steppe zone with xerophytic and ruderal vegetation. The test site is on a very gentle slope of the enclosed depression (Stepova Dolyna pod). Here, Endogleyic Kastanozems (dark chestnut gleyic soils) occur having clay loam texture and slight signs of salinization. The climate is rather dry with hot summers and mild winters. The average temperature in January is –1.6 °C, and in July – +22.9 °C. The average annual precipitation is 430–450 mm (Osadchyi et al., 2022).

***Soil sampling.*** The study site was split into 20 small square plots of 100 m$^2$ each (Fig. 2). Incremental (mixed) samples were taken from each cell (small plot), which included at least 5 smaller samples from different parts of the cell. They were taken regardless of their location relative to craters or bombturbated soils in order to test the validity and applicability of the incremental sampling technique. The incremental sampling protocol is widely recognized as the opposite of discrete soil sampling (Brewer, Peard, & Heskett, 2017).

Samples were collected from the topsoil (upper 20 cm). The sampling depth was justified by (1) the concentration of the most contaminants in the topsoil in the first years after the warfare (Bonchkovskyi et al., 2025; Solokha et al., 2024); (2) the short period of time after the war damage to the soil – two years, which is not enough for the downward migration of contaminants; (3) the loamy clay texture of the soils impedes downward migration of contaminants, especially heavy metals.

Two experts participated in the sampling process – the first one took notes and the second one collected samples in the zip-lock bags. Each sample weighed about 500 g and was duplicated and homogenized to avoid errors in laboratory measurements. The background sample was collected 5 km away from the test site with the same landform and soil. Due to the dense soil cratering, it was almost impossible to take a background sample closer.

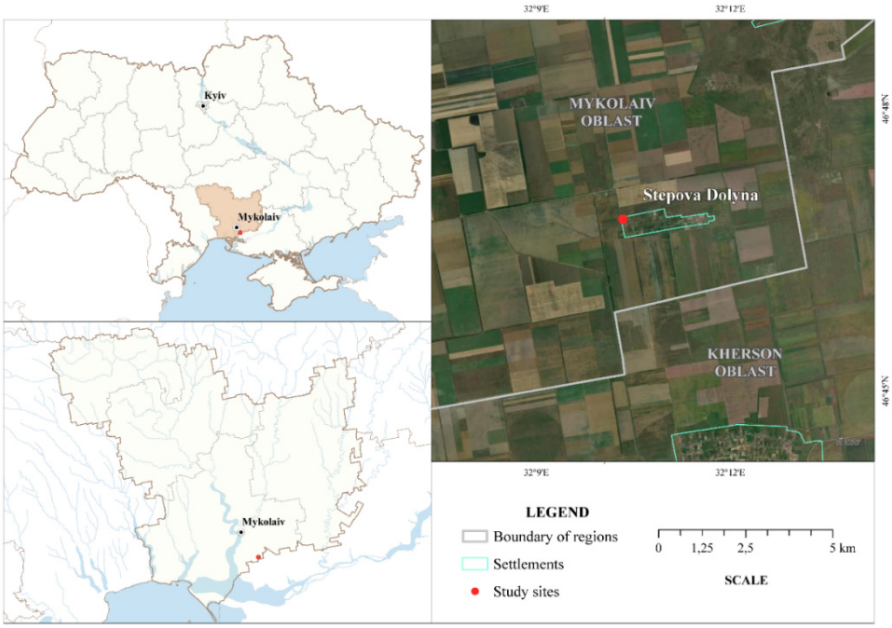



**Fig. 1. Test site location**

***X-ray fluorescence analysis.*** The first step in the laboratory phase of the research was to homogenise the samples in order to reduce the degree of heterogeneity in the distribution of different fractions of the soil's solid phase. The next step was to dry the samples in ovens at a temperature of 40°C for 6 hours. Bringing the sample to a completely dry state was not possible due to the specifics of XRF analysis and the risk of destruction of some elements due to the high temperatures. Homogenisation ensured a uniform drying process. An agate mortar was used to grind the samples with purpose to avoid the contamination of the analysis. The sample was then sieved through a 1 mm laboratory sieve. The resulting fraction was pressed into 25 ml cylindrical plastic cuvettes and sealed with a polymer film. This was the end of the laboratory preparation of the samples.

For XRF analysis, we used ElvaX ProSpector 3 Advanced with the following specifications: X-ray tube – Rh, 40 kV; primary filter – automatic 8-position; the collimator – automatic 2-position; detector window – graphene, 1 μm; spectral range: Mg-U. The sample was measured three times.

XRF analysis and XRF spectrometry itself is based (Neikov, Naboychenko, & Yefimov, 2022) on the excitation of atoms of material under by a beam of X-rays, which leads to secondary fluorescence emission. The intensity of X-ray fluorescence directly depends on the concentration of each element in the sample. Analysis of the spectra allows determining the elemental composition of the sample. We used an X-ray tube with an Rh anode, which is the most common device in this field of technology. Typically, XRF analysis is used to determine the concentrations of elements from beryllium (Z=4) to uranium (Z=92) in the range from ppm to 100 % with an accuracy of $10^{-7}$–$10^{-6}$ g. Heavier elements (with a higher Z) tend to emit X-rays with higher energy because they have more tightly bound electrons in their inner shells. The resulting spectrum is mathematically processed to allow for quantitative and qualitative (semi-quantitative) analysis. In modern XRF spectrometers, amplifiers and pulse analysers allow for the measurement of the elemental composition of a sample in less than 2 seconds with a satisfactory statistical error.

***Atomic-absorption analysis.***

The microwave oven (Ethos Easy Microwave Sample Preparation System, Milestone, USA) was applied for sample preparation. The system was equipped with high-pressure TFM vessels (Maxi-44 high – throughput rotor, T2 infrared temperature control, option P2 pressure control). The microwave program BCS 300 was previously changed to run with a maximum power of 1800 W. Microwave decomposition of samples was carried out with the addition of 5 ml of 65 % concentrated nitric acid (analytical grade) and of 1 ml of 35% peroxide. The wet digestion of 250 mg of each sample was conducted in closed TFM vessels during 35 minutes, max temperature was +200 °C.

The content of Cd, Pb, Zn, Cu was measured in 6 random samples using the atomic-absorption spectrometry (AAS) ContrA 800D (Analytik Jena, Germany). Measurements were performed in triplicate. The content of As was measured in 6 random samples using the hydride attachment HS60A/HS (Analytik Jena, Germany) according to the instructions for the device with the use of NaBH4, KJ, Ascorbic Acid (analytical grade). Measurements were performed in triplicate.

The following standards were used to determine concentrations and construct calibration graphs: Standart solution IV-Stock-4 1000 μg/mL in 5 % v/v Nitric Acid (Inorganic ventures, USA). Standart solution (CGAS1) of As 1000 μg/mL in 2 % v/v Nitric Acid (Inorganic ventures, USA).

**Results**

***Soil disturbance.*** The study site is characterised by the significant soil disturbance: 7 craters with a diameter of 1.7–4.4 m and a depth of 0.2–0.7 m were identified. The craters were caused mainly by 120 mm mortars or 122 mm multiple launch rocket system (MLRS) BM-21 'Grad'. The largest one was caused by the detonation of a 152 mm artillery shell. Thus, the crater density on the test site is 35 craters per hectare, and the total volume of displaced soil is 11.0 $m^3$. More detailed parameters of the surveyed craters are presented in (Tab. 1).

***Table 1***

**Parameters of craters within the study site**

| № | Diameter, m | Depth, m | Volume of displaced soils, $m^3$ | Projectile type | Soil disturbance | Crater state |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.4 | 0.6 | 4.1 | 152 mm | Ah and B soil horizons | Overgrown with vegetation |
| 2 | 3.2 | 0.7 | 2.5 | 152 / 155 mm | Ah and B soil horizons | Partially overgrown with vegetation |
| 3 | 2.1 | 0.4 | 0.6 | 120 / 122 mm | Ah soil horizon | Overgrown with vegetation |
| 4 | 2.6 | 0.5 | 1.2 | 120 / 122 mm | Ah and B soil horizons | |
| 5 | 2.2 | 0.5 | 0.9 | 120 / 122 mm | Ah and B soil horizons | |
| 6 | 2.5 | 0.5 | 1.1 | 120 / 122 mm | Ah and B soil horizons | |
| 7 | 1.9 | 0.3 | 0.4 | 120 / 122 mm | Ah soil horizon | |

Craters destroy mostly Ah and B/Bk horizons of the Kastanozem (Fig. 2). The crater slopes are overgrown with ruderal vegetation, which restrains the erosion and the crater's filling with soil deposits. This resulted in good preservation of the craters in their primary hemisphere form. No signs of ramparts around the craters were found (except for crater No. 1), given their small size and depth. No visual signs of bombturbation zones (according to Bonchkovskyi et al., 2023) were found on the topsoil.

***Heavy metals content.*** The heavy metal content within the test site does not exceed the background values, and the spatial variability of heavy metal content is almost not related to the location of the craters. However, such variability is still observed (Fig. 3). None of the tested soil samples showed heavy metal content above the maximum permissible concentrations (except for Cd in one sample). This is due to the lack of industrial soil contamination before and during the war.

Lead content ranges from 15–22 mg/kg according to XRF analysis and from 9.7 to 18.6 mg/kg according to AAS (Table 2). The copper content according to AAS is 32.0–34.9 mg/kg, while XRF analyser detected copper in several samples (20–22 mg/kg). The zinc concentration determined by AAS is two times higher than measured by XRF analyser – 80.0–90.9 ppm versus 31–46 mg/kg. The cadmium content is below the detection limit of the XRF analyser. However, AAS yielded Cd concentration around of 1.1–1.4 mg/kg. Significant enrichment with cadmium is detected only in one sample (2.1 mg/kg), which was not collected near the crater.




**Fig. 2. Craters within the study site.**
**General view of the study site (A). Crater from a 152 mm ordnance (B); Crater from a 120 / 122 mm ordnance (C)**

The chromium content (measured by XRF analyser) ranges from 39 to 80 mg/kg and vanadium from 60 to 130 mg/kg and does not correlate with the location of the craters. The screening revealed insignificant concentrations of molybdenum, arsenic and tin in some samples. Only lead showed elevated concentrations near craters from the whole range of measured elements.

**Discussion and conclusions**

Soil contamination with heavy metals has been reported at many sites affected by military operations worldwide (Broomandi et al., 2020; Certini, Scalenghe, & Woods, 2013; Tešan Tomić et al., 2018; Vidosavljević et al., 2013; Williams, & Rintoul-Hynes, 2022; and others) and in Ukraine (Solokha et al., 2022, 2024; Splodytel et al., 2023; Tonkha et al., 2025; Zaitsev et al., 2022; and others). Most studies have shown that they are not highly contaminated with heavy metals (Bonchkovskyi et al., 2025; Bondar et al., 2025; Datsko et al., 2024; Smirnova et al., 2024; Solokha et al., 2022), despite initial findings of critical contamination (Shebanina et al., 2024; Splodytel et al., 2023; Zaitsev et al., 2022). The most considerable contamination with cadmium, copper, zinc and lead has been reported by the cited authors (Bonchkovskyi et al., 2025), collecting samples at different distances from craters, showed that the content of heavy metals decreases from crater to background, rarely showing peaks at the crater rim. However, the average content of heavy metals near the craters exceeded that in the background sample by only 1.2–1.5 times.

***Table 2***

**Comparison of trace elements content (ppm) determined by portable XRF analyser and AAS ContrA 800 D.**

| Sample number | Lead (Pb) | | Copper (Cu) | | Zinc (Zn) | | Cadmium (Cd) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | AAS | XRF | AAS | XRF | AAS | XRF | AAS | XRF |
| 1 | 12.07 | 15 | 32.01 | - | 82.55 | 45 | 1.101 | - |
| 3 | 9.67 | 18 | 32.39 | 22 | 85.83 | 42 | 1.141 | - |
| 6 | 13.63 | 13 | 34.85 | 20 | 90.91 | 35 | 1.208 | - |
| 12 | 16.91 | 16 | 32.70 | - | 79.95 | 36 | 1.325 | - |
| 15 | 18.59 | 22 | 34.26 | - | 86.33 | 46 | 2.056 | - |
| 21 | 12.22 | 14 | 32.61 | - | 82.7 | 31 | 1.354 | - |

The study site near the Stepova Dolyna did not reveal significant contamination with heavy metals. Only cadmium showed high concentration in one sample, therefore it can be related to the local contamination, which is not associated with the cratering. It is impossible to compare our results with findings of Bulba et al. (2024) and Splodytel (2023), who reported critical contamination with heavy metals. This is due to the fact that Splodytel (2023) did not specify the methodology of soil sampling, whereas Bulba et al. (2024) did not specify the type of damage and soil typology and took background samples far from the damaged areas.

Our study revealed that only lead shows a slight enrichment near craters (Fig. 3). The concentrations of other heavy metals are not associated with craters. On the other hand, this may be a drawback of the incremental sampling protocol since it represents the average elemental content within a plot.

The highest levels of contamination have been independently recorded by researchers at the sites of military equipment explosions (Bonchkovskyi et al., 2025; Solokha et al., 2024; Zaitsev et al., 2022), where soils are contaminated with various substances, including heavy metals, oil products, polycyclic hydrocarbons, and even radioactive elements. Tonkha et al. (2025) also found significant soil pollution at military positions and fortifications. However, there are currently no published results of geochemical analyses at the sites of military equipment explosions in Mykolaiv region.

Datsko et al. (2024) proposed the use of X-ray fluorescence analysis to accelerate of soil chemical survey in the war-affected areas. Vanhoof, Corthouts, & Tirez, (2004); Vanhoof et al. (2013) demonstrated that portable XRF systems are quite effective for preliminary assessment of contaminated soils. Our results show that the efficiency of a portable XRF analyser depends on the element and its detection limit. Very good agreement between the portable XRF analyser and the AAS was found for lead content. The zinc content measured by the AAS is constantly twice than that determined by the XRF analyser, which may be a result of the analyser settings. Due to the low concentrations of copper, cadmium and arsenic in the soil, the XRF analyser cannot measure them. However, the XRF system can accurately identify areas contaminated with Cu, Cd and As. On the other hand, we believe that the technical parameters and setting of specific portable XRF systems determine the accuracy of the measurement. Thus, portable XRF systems are very useful for screening soil contamination with heavy metals, notably when sample preparation is performed. However, accurate measurements of heavy metal concentrations require precise laboratory methods, such as inductively coupled plasma spectrometry or atomic absorption spectrometry.

Thus, the soil contamination with heavy metals due to explosion of artillery shells, MLRS and mortar is slight. No heavy metal enrichment is observed near craters which can indicate drawbacks of taking incremental samples in the case of high-resolution studies. The portable XRF analyser enables to rapidly test the war-damaged soils for heavy metals and identify areas of heavy metal contamination. However, more precise laboratory methods are required to provide accurate data on heavy metal contamination.

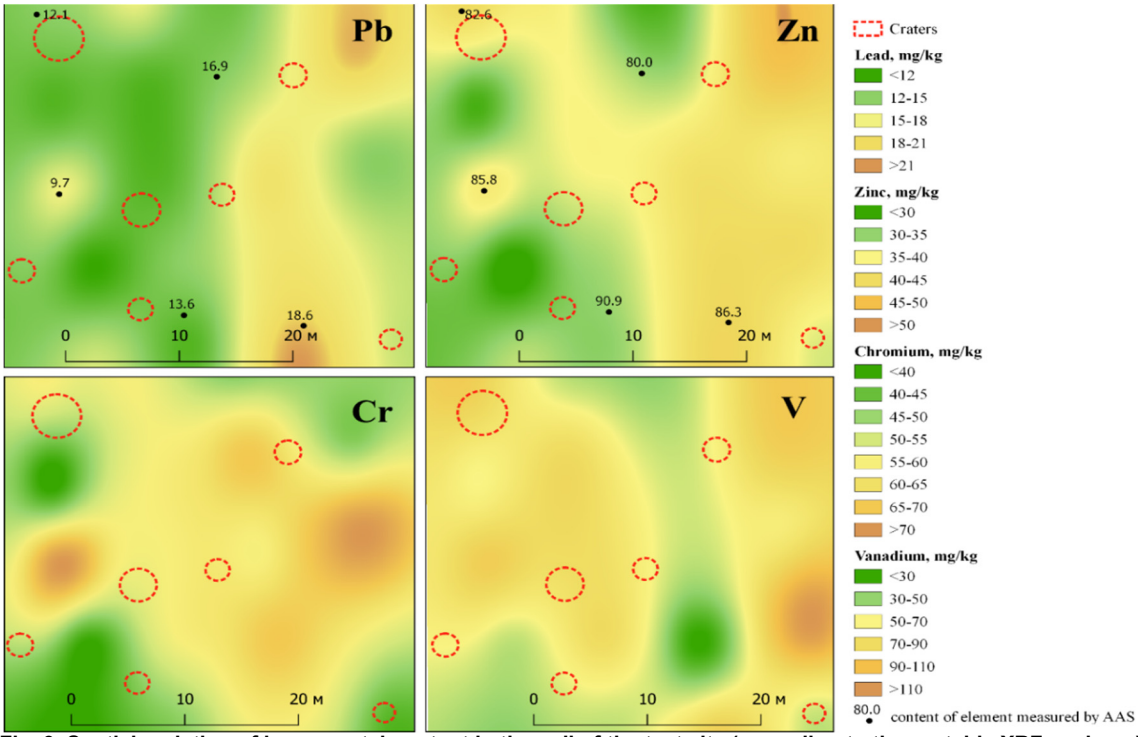



**Fig. 3. Spatial variation of heavy metal content in the soil of the test site (according to the portable XRF analyser)**

**Authors' contribution:** Oleksandr Bonchkovskyi – writing, conceptualization, methodology; Pavlo Ostapenko – writing, conceptualization; Yaroslava Zhukova – writing, methodology; Illia Kravchuk – writing, methodology, data validation; Serhii Petryshchenko – methodology; Adelina Lazarets – field works, formal analysis; Oleksandr Halahan – methodology; Nazar Stepanenko – methodology.

**Acknowledgments.** The research was carried out as part of the International assistance project No. 5673 "Landscape Lab KNU as a laboratory hub for environmental education and research" funded by the Government of the Swiss Confederation through the Swiss Agency for Development and Cooperation (SDC), implemented by the NGO "Ukrainian Researchers Society" in cooperation with the Taras Shevchenko National University of Kyiv.

**References**

Baliuk, S. A., Kucher, A. V., Solokha, M. O., & Solovei, V. B. (2024). Assessment of the impact of armed aggression of the rf on the soil cover of Ukraine. *Ukrainian Geographical Journal*, 1, 7–18 [in Ukrainian]. [Балюк, С. А., Кучер, А. В., Солоха, М. О., & Соловей, В. Б. (2024). Оцінювання впливу збройної агресії рф на ґрунтовий покрив України. *Український географічний журнал*, 1, 07–18].

Bausinger, T., Bonnaire, E., & Preuss, J. (2007). Exposure assessment of a burning ground for chemical ammunition on the Great War battlefields of Verdun. *Science of the Total Environment*, 382(1), 259–271. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.04.029

Biyashev, B., Drobitko, A., Markova, N., Bondar, A., & Pismenniy, O. (2024). Chemical analysis of the state of Ukrainian soils in the combat zone. *International Journal of Environmental Studies*, 81(2), 199–207. https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2271754

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

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

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

Brewer, R., Peard, J., & Heskett, M. (2017). A critical review of discrete soil sample data reliability: Part 1 – field study results. *Soil and Sediment Contamination*, 26(1), 1–22. http://dx.doi.org/10.1080/15320383.2017.1244171

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

Bulba, I., Drobitko, A., Zadorozhnii, Y., & Pismennyi, O. (2024). Identification and monitoring of agricultural land contaminated by military operations. *Scientific Horizons*, *7*(27), 107–117. https://doi.org/10.48077/scihor7.2024.107

Certini, G., Scalenghe, R., & Woods, W. I. (2013). The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*, 127, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.08.009

Datsko, O., Melnyk, O., Kovalenko, I., Butenko, A., Zakharchenko, E., Ilchenko, V., Onychko, V., & Solokha, M. (2025). Estimation of the content of trace metals in Ukrainian military-affected soils. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, *53*(1), 14328–14328. https://doi.org/10.15835/nbha53114328

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

Dent, D., Boincean, B., Dmytruk, Y., & Bai, Z. (2022). A candle in the wind. *International Journal of Environmental Studies*, *79*(4), 587–596. https://doi.org/10.1080/00207233.2022.2085454

Dmytrenko, O., Demyanyuk, O., Pohorila, L., Svydyniuk, N., Rozha, V., Kyryliuk, P., & Romanenko, V. (2023). Ecotoxicological assessment of soddy-podzolic soil under the influence of hostilities. *Agroecological Journal*, 4, 89–96 [in Ukrainian]. [Дмитренко, О., Дем'янюк, О., Погоріла, Л., Свидинюк, Н., Рожа, В., Кирилюк, П., & Романенко, В. (2023). Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій. *Агроекологічний журнал,* 4, 89–96]. https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758

Korsun, S., Bolokhovska, V., Bolokhovskyi, V., Khomenko, T., Borko, Yu., Demyanyuk, O., & Kostyna, T. (2024). Agroecological substantiation of meliorative factors for restoration of soils disturbed by military actions. *Agroecological Journal*, 2, 100–112 [in Ukrainian]. [Корсун. С., Болоховська, В., Болоховський, В., Хоменко, Т., Борко, Ю., Дем'янюк, О., & Костипа, Т. (2024). Агроекологічні обґрунтування меліоративних чинників для відновлення ґрунтів, порушених бойовими діями. *Агроекологічний журнал,* 2, 100–112]. https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2024.305663

Meaza, H., Ghebreyohannes, T., Nyssen, J., Tesfamariam, Z., Demissie, B., Poesen, J., Gebrehiwot, M., Weldemichel, T. G., Deckers, S., Gidey, D. G., & Vanmaercke, M. (2024). Managing the environmental impacts of war: What can be learned from conflict-vulnerable communities? *Science of The Total Environment*, 927, 171974. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171974

Meerschman, E., Cockx, L., Islam, M. M., Meeuws, F., & Van Meirvenne, M. (2011). Geostatistical assessment of the impact of World War I on the spatial occurrence of soil heavy metals. *Ambio*, 40(4), 417–424. https://doi.org/10.1007/s13280-010-0104-6

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

Neikov, O. D., Naboychenko, S. S., & Yefimov, N. A. (2022). *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (Second Edition). In *Elsevier eBooks*. https://doi.org/10.1016/c2014-0-03938-x

Osadchyi, V., Skrynyk, O., Palamarchuk, L., Skrynyk, O., Osypov, V., Oshurok, D., & Sidenko, V. (2022). Dataset of gridded time series of monthly air temperature (min, max, mean) and atmospheric precipitation for Ukraine covering the period of 1946–2020. *Data Brief*, 44, 108553. https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108553

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

Shebanina, O., Kormyshkin, I., Bondar, A., Bulba, I., & Ualkhanov, B. (2024). Ukrainian soil pollution before and after the Russian invasion. *International Journal of Environmental Studies*, 81(2), 208–215. https://doi.org/10.1080/00207233.2023.2245288

Smirnova, K., Baliuk, S., Kucher, A., Vorotyntseva, L., & Honcharova, A. (2024). Ecological and toxicological condition of militarily degraded chernozems: A case study of the Chkalovsk territorial community. *Scientific Horizons*, 11(27), 90–104. https://doi.org/10.48077/scihor11.2024.90

Solokha, M., Demyanyuk, O., Symochko, L., Mazur, S., Vynokurova, N., Sementsova, K., & Mariychuk, R. (2024). Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*, 13(11), 1614. https://doi.org/10.3390/land13101614

Solokha, M., Pereira, P., Symochko, L., Vynokurova, N., Demyanyuk, O., Sementsova, K., Inacio, M., & Barcelo, D. (2023). Russian-Ukrainian war impacts on the environment. Evidence from the field on soil properties and remote sensing. *Science of The Total Environment*, 902, 166122. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166122

Solokha, M. O., Smirnova, K. B., Vynokurova, N. V., & Sementsova, K. O. (2022). Variability of the geochemical and granulometric composition of the soils of the forest steppe of Ukraine under the influence of combat actions. *Agrarian Innovations*, 14, 109–116 [in Ukrainian]. [Солоха, М.О., Смірнова, К.Б., Винокурова, Н.В., & Семенцова, К.О. (2022). Варіабельність геохімічного та гранулометричного складу ґрунтів лісостепу України під впливом бойових дій. *Аграрні інновації,* 14*,* 109–116]. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2022.14.16

Splodytel, A. (2023). The impact of hostilities on the soil cover of Mykolaiv region. In *Post-war development of the nature reserve fund of Mykolaiv region* (pp. 7–31). Druk-Art [in Ukrainian]. [Сплодитель, А. (2023). Вплив бойових дій на ґрунтовий покрив Миколаївської області. В *Поствоєнний розвиток природно-заповідного фонду Миколаївщини* (с. 7–31.). Друк-Арт].

Splodytel, A., Holubtsov, O., Chumacheko, S., & Sorokina, L. (2023). *The Impact of Russia's War against Ukraine on the State of Ukrainian Soil*. Ecodia Centre for Environmental Initiatives [in Ukrainian]. [Сплодитель, А., Голубцов, О., Чумаченко, С., & Сорокіна. Л. (2023). *Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів*. Центр екологічних ініціатив "Київ"].

Tešan Tomić, N., Smiljanić, S., Jović, M., Gligorić, M., Povrenović, D., & Došić, A. (2018). Examining the effects of the destroying ammunition, mines and explosive devices on the presence of heavy metals in soil of open detonation pit; Part 2: Determination of heavy metal fractions. *Water, Air & Soil Pollution*, 229(9), 303. https://doi.org/10.1007/s11270-018-3950-7

Tonkha, O., Menshov, O., Litvinov, D., Bondar, K., Glazunova, O., Litvinova, O., Pikovska, O., & Zabaluev, V. (2025). Assessment of soil pollution levels in Southern Ukraine damaged by military actions. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 30–38 [in Ukrainian]. [Тонха, О., Меньшов, О., Літвінов, Д., Бондар, К., Глазунова, О., Літвінова, О., Піковська, О., & Забалуєв, В. (2025). Оцінка рівнів забруднення ґрунтів півдня України, пошкоджених воєнними діями. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(108), 30–38]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04

Vanhoof, C., Corthouts, V., & Tirez, K. (2004). Energy-dispersive X-ray fluorescence systems as analytical tool for assessment of contaminated soils. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(4), 344–350. https://doi.org/10.1039/B312781H

Vanhoof, C., Holschbach-Bussian, K. A., Bussian, B. M., Cleven, R., & Furtmann, K. (2013). Applicability of portable XRF systems for screening waste loads on hazardous substances as incoming inspection at waste handling plants. *X-Ray Spectrometry*, 42(4), 224–231. https://doi.org/10.1002/xrs.2485

Vidosavljević, D., Puntarić, D., Gvozdić, V., Jergović, M., Miškulin, M., Puntarić, I., Puntarić, E., & Šijanović, S. (2013). Soil contamination as a possible long-term consequence of war in Croatia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 63(4), 322–329. https://doi.org/10.1080/09064710.2013.777093

Williams, O. H., & Rintoul-Hynes, N. L. J. (2022). Legacy of war: Pedogenesis divergence and heavy metal contamination on the WWI front line a century after battle. *European Journal of Soil Science*, 73(2), e13297. https://doi.org/10.1111/ejss.13297

Zaitsev, Yu., Hryshchenko, O., Romanova, S., & Zaitseva, I. (2022). Influence of combat actions on the content of gross forms of heavy metals in the soils of Sumy and Okhtyrka districts of Sumy region. *Agroecological Journal*, 3, 136–149 [in Ukrainian]. [Зайцев, О., Грищенко, О., Романова, С., & Зайцева, І. (2022). Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської області. *Агроекологічний журнал,* 3, 136–149 ]. https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2022.266419

**Отримано редакцією журналу / Received: 14.08.25**
**Прорецензовано / Revised: 16.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Олександр БОНЧКОВСЬКИЙ[1,2], д-р філософії, наук. співроб.**
**ORCID ID: 0000-0003-1872-4552**
**e-mail: geobos2013@gmail.com**

**Павло ОСТАПЕНКО[1,4], канд. геогр. наук, докторант**
**ORCID ID: 0000-0002-2656-7377**
**e-mail: ostapenkopavlo@gmail.com**

**Ярослава ЖУКОВА[3], канд. біол. наук**
**ORCID ID: 0000-0002-2755-5431**
**e-mail: yaf_z@ukr.net**

**Ілля КРАВЧУК[1,4], асп.**
**ORCID ID: 0000-0001-5247-7255**
**e-mail: elijah.kravchuk@gmail.com**

**Сергій ПЕТРИЩЕНКО[3], наук. співроб.**
**ORCID ID: 0009-0004-4168-969X**
**e-mail: sergijps@ukr.net**

**Аделіна ЛАЗАРЕЦЬ[1], магістр**
**ORCID ID: 0009-0007-5298-7707**
**e-mail: adelinalazarets@gmail.com**

**Олександр ГАЛАГАН[4], канд. геогр. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0003-1449-3638**
**e-mail: geolab@ukr.net**

**Назар СТЕПАНЕНКО[3], магістр**
**ORCID ID: 0009-0005-6641-5887**
**e-mail: nazar2067@gmail.com**

**[1]ГО "Товариство дослідників України", Київ, Україна**
**[2]Інститут географії НАН України, Київ, Україна**
**[3]Інститут охорони ґрунтів України, Київ, Україна**
**[4]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна**

# ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ВНАСЛІДОК ВЕДЕННЯ БОЙОВИХ ДІЙ: РЕЗУЛЬТАТИ З ТЕСТОВОЇ ДІЛЯНКИ У МИКОЛАЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

**В с т у п .** ***Війна в Україні серйозно впливає на фізичні, хімічні та біологічні властивості ґрунтів. Хімічне забруднення ґрунтів у зонах ведення бойових дій є однією з найбільш дискутованих тем, оскільки в процесі детонації зброї різного типу в ґрунт потрапляє комплекс забруднювачів, серед яких одним із найтоксичніших є важкі метали. Як наслідок – сформувалися протилежні думки стосовно рівня забруднення важкими металами.***

**ISSN 1728-3817**

**Методи.** *Вміст важких металів на досліджуваній ділянці площею 2000 м$^2$ (с. Степова Долина) було виміряно за допомогою портативного рентгенофлуоресцентного аналізатора. Для визначеності точності рентгенофлуоресцентного аналізу вміст важких металів (Cd, Zn, Pb, Cu, As) додатково визначено за допомогою атомно-абсорбційної спектрометрії (ContrA 800 D).*

**Результати.** *Дослідження латеральної мінливості вмісту різних важких металів на тестовій ділянці у Миколаївській області, сильно постраждалій від артилерійських обстрілів у 2022 році, практично не виявили забруднення ґрунтів важкими металами (окрім кадмію в одному зразку). Здебільшого вміст важких металів не пов'язаний із розташуванням кратерів (за винятком свинцю), концентрація якого зростає поблизу кратерів. Для вмісту свинцю виявлено дуже хороше узгодження між портативним рентгенофлуоресцентним аналізатором і атомно-абсорбційною спектрометрією. Через низькі концентрації міді, кадмію та миш'яку в ґрунті рентгенофлуоресцентний аналізатор не має можливості до їх вимірювання.*

**Висновки.** *На досліджуваній ділянці забруднення ґрунту важкими металами внаслідок вибухів артилерійських снарядів, РСЗВ та мінометів є незначним. Поблизу кратерів не прослідковується збагачення важкими металами, що може свідчити про недоліки відбору змішаних проб у разі проведення досліджень з високою роздільною здатністю. Використання портативного рентгенофлуоресцентного аналізатора дає змогу швидко перевірити пошкоджені війною ґрунти на вміст важких металів та виявити місця забруднення важкими металами. Однак для отримання точних даних про забруднення важкими металами потрібні більш точні лабораторні методи.*

**Ключові слова:** *російсько-українська війна, ґрунти, важкі метали, забруднення, портативний рентгенофлуоресцентний аналізатор, атомно-абсорбційна спектрометрія.*

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

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

УДК 631.417.1:551.435.11(477.86)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.07

Олексій БЕРЕЗОВСЬКИЙ[1], канд. с.-г. наук
ORCID ID: 0000-0002-0909-1119
e-mail: ol11111bz@gmail.com

Світлана МІДИК[1], канд. вет. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0002-2682-2884
e-mail: svit.mid@gmail.com

Валентина КОРНІЄНКО[1,2], д-р біол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-0403-7727
e-mail: kornienko-valentina1966@ukr.net

Оксана САМКОВА[2]
ORCID ID: 0000-0002-2132-3357
e-mail: samkova_op@ukr.net

Оксана ТОНХА[1], д-р с.-г. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-0677-5494
e-mail: tonkha.o@nubip.edu.ua

Юрій ВІШОВАН[1], д-р філософії
ORCID ID: 0000-0003-1128-593X
e-mail: anatomi1991@gmail.com

Лариса СЕМЕНКО[1], канд. с.-г. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-4586-3681
e-mail: Larisa-s@ukr.net

Максим СМИРНИЙ[3], асп.
ORCID ID: 0009-0000-1274-6596
e-mail: maksim.smirnyy@gmail.com

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна
[2]Українська лабораторія якості і безпеки продукції АПК, Київ, Україна
[3]Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна

# ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ПОЛІЦИКЛІЧНИМИ АРОМАТИЧНИМИ ВУГЛЕВОДНЯМИ МУЛУ І ҐРУНТУ ДНІСТРОВСЬКОГО КАНЬЙОНУ В МЕЖАХ ГОРОДЕНКІВСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником Олександром МЕНЬШОВИМ)*

**В с т у п .** *Проведено оцінку стану забруднення екотоксикантами ґрунтів і річкового осаду на території Городенківської територіальної громади, що прилягає до Дністровського регіонального ландшафтного парку (РЛП) та розташована на правобережжі річки Дністер.*

**М е т о д .** *Високоефективною рідинною хроматографією (ВЕРХ) проаналізовано проби мулу і ґрунту на вміст 15 поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ): нафталену, аценафтену, флуорену, фенантрену, антрацену, флуорантену, пірену, бенз(а)нтрацену, хризену, бенз(б)флуорантену, бенз(к)флуорантену, бенз(а)пірену, дибенз(а,h)антрацену, бенз(g,h,i)перилену, індено(1,2,3-cd)пірену. Відбір проб проводили в локаціях Коломийського району, в Івано-Франківській обл., які віддалені від джерел забруднень (фоновий вміст забруднювальних речовин) та безпосередньо біля джерел забруднень (автодороги, стічні води).*

**Р е з у л ь т а т и .** *Серед усіх відібраних зразків поверхневого ґрунту та річкового осаду сума концентрації 15 ПАВ була найнижчою в лісовому ґрунті (103 мкг/кг). У пробі річкового осаду річки Дністер сумарна концентрація становила 449 мкг/кг. У пробах річкового осаду річок Лемиць і Дереновець, в напрямку від населених пунктів с. Стрільче і с. Серафинці до Дністра, виявлена загальна концентрація ПАВ була значно вищою, ніж у річці Дністер. Вона знижувалася в цьому напрямку з максимальної 11471 мкг/кг (проби відібрані до очисних споруд) до 2005 мкг/кг. На березі річки Лемиць у ґрунті вона становила 583 мкг/кг.*

**В и с н о в к и .** *Висока концентрація ПАВ в окремих пробах річкового осаду р. Лемиць і р. Дереновець може бути зумовлена близькістю їх до автодоріг і населених пунктів, активне їх накопичення через повільну біодеградацію цих сполук у річковому осаді. Найвищу концентрацію суми ПАВ (64,034 мг/кг) було виявлено у ґрунті придорожньої смуги автомобільної дороги регіонального значення Р24. У зразках ґрунту, відібраних на відстані 300 м від цієї автодороги, виявляли незначний вміст усіх 15 ПАВ (275 мкг/кг) з концентрацією бенз(а)пірену 9,29 мкг/кг, що є нижчими значеннями від гранично допустимої концентрації (20 мкг/кг). Домінування 4–5-кільцевих ПАВ (флуорантен, пірен, хризен, бенз(а)антрацен бензо(b)флуорантен, бензо(k)флуорантен, бензо(а)пірен) вказує на тривалий вплив джерел забруднення і накопичення цих речовин у ґрунті.*

**К л ю ч о в і  с л о в а :** *Дністровський каньйон, ґрунти, поліароматичні вуглеводні, техногенне забруднення, військові дії.*

## Вступ

***Постановка проблеми.*** Долина Дністра та його приток сильно врізана з крутими, часом каньйоноподібними схилами, які піднімаються над рівнем Дністра на 150–180 м і більше. Тут річка утворює ряд добре розвинених меандр і формує каньйон завдовжки 250 км. Цей каньйон

© Березовський Олексій, МІДИК Світлана, Корнієнко Валентина, Самкова Оксана, Тонха Оксана, Вішован Юрій, Семенко Лариса, Смирний Максим, 2025

ISSN 1728-3817

один із найбільших не лише в Україні, а й в Європі та розташований на межі чотирьох областей: Івано-Франківської, Тернопільської, Хмельницької і Чернівецької (Денисик, 1996). Рішенням Івано-Франківської обласної ради від 15 липня 1993 р. та 9 грудня 2016 р., на підставі рішення Тлумацької та Городенківської районних рад було створено комунальне підприємство "Дністровський регіональний ландшафтний парк імені Сергія Дідича", який займає площу 19650 га.

Ґрунтовий покрив території Дністровського РЛП представлений в основному чорноземами типовими малогумусними, часто чорноземами опідзоленими, сірими та світло-сірими лісовими ґрунтами (Адаменко, Зорін, & Мосюк, 2020). Структури забруднень екотоксикантами та джерел трансформації екосистеми р. Дністер мало відрізняються від інших великих річок України. Найбільше впливає гідроенергетика, забруднення промисловими підприємствами, побутовими стоками, а також дифузне забруднення із сільськогосподарських земель. Значний внесок у забруднення вод дають точкові джерела, до яких належать підприємства тваринництва, комунального господарства і промисловості (Дегодюк та ін., 2024), а також забруднення як наслідок військових дій.

Забруднення води стало глобальною проблемою в останні десятиліття в результаті промислового та сільськогосподарського розвитку, наслідком якого є накопичення у водоймах органічних забрудників, таких як поліароматичні вуглеводні (ПАВ) (Wang et al., 2019). Ґрунт є кінцевою мішенню та поглиначем можливих забруднювачів, таких як потенційно токсичні елементи, що розсіяні в різних середовищах внаслідок діяльності людини. Забруднення ґрунту значно зростає в усьому світі та пов'язане з масовою урбанізацією та неконтрольованою сільськогосподарською та інтенсивною промисловою діяльністю (Veremeenko et al., 2021; Войціцький та ін., 2022).

***Аналіз останніх досліджень і публікацій.*** Забруднення ґрунтів ПАВ є наслідком як природних процесів, так і антропогенного впливу на екосистеми, а останнім часом додалися забруднення військового характеру. Найчастіше вони утворюються внаслідок згоряння викопного палива під час процесів опалення і автомобільних вихлопів, розливу чи пошкодження ємностей з нафтопродуктами (Zhao, Chu, & Gu, 2012). Концентрація ПАВ у ґрунтах сильно відрізняється залежно від того, наскільки активно території зазнають антропогенного впливу, і вона вища в регіонах з більшою кількістю населення, а також у місцях розміщення великих промислових об'єктів (Froger et al., 2021). Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) визначило список із 16 ПАВ пріоритетними забруднювачами з погляду їх токсичності (U.S. EPA, 1979).

Цей перелік став основою для розробки аналітичних методів визначення ПАВ у навколишньому середовищі. У цьому списку найбільш токсичною сполукою є бенз(а)пірен, тому за його вмістом у різних країнах контролюється стан компонентів екосистем та безпека харчової продукції. Гранично допустима концентрація бенз(а)пірену для ґрунту в Україні регламентується на рівні 0,02 мг/кг (Кабінет Міністрів України, 2025). Підтверджено токсичний і мутагенний вплив поліароматичних вуглеводнів на живі організми за даними багатьох досліджень, в різних країнах (Березовський та ін., 2025; Mallah et al., 2022; Sun et al., 2021; Zhang, & Zhang, 2023). За даними деяких досліджень встановлено також токсичність окремих ПАВ, що раніше не були віднесені до списку пріоритетних, але визначення ступеня їх токсичності та канцерогенності потребує подальших досліджень (Da Silva Junior et al., 2021).Слід відзначити, що для визначення забруднення ґрунтового покриву останнім часом залучаються дешеві та експресні магнітні методи (Menshov et al., 2012; Menshov, Kruglov, & Sukhorada, 2012; Menshov et al., 2021).

З метою оцінки екологічної ситуації на прилеглій до частини Дністра території, де розташований Національний природний парк "Дністровськиий каньйон", було проаналізовано на вміст ПАВ донні осади Дністра і окремих річок (р. Лемиць та р. Дереновець), які є частиною басейну р. Дністер; ґрунти на території сільськогосподарських угідь, автодороги і лісу, розташованих на правобережжі Дністра (Городенківська територіальна громада, Коломийський район).

***Мета досліджень***. Мета роботи – проаналізувати екологічну ситуацію в межах правобережжя Дністровського каньйону (Городенківська територіальна громада) на вміст ПАВ. Завдання – провести дослідження донних осадів (мулу) річок Лемиць, Дереновець та Дністер, куди потрапляють побутові стоки і відходи підприємств харчової переробки, а також ґрунтів з різних локацій відносно автодороги.

**Методи**

Дослідження ґрунту проводилися на території Коломийського району Івано-Франківської області. Зразки було відібрано на прилеглій території навколо р. Лемиць, які включають в себе ґрунт на березі та на відстані 150 м від неї, територіально с. Стрільче та на відстані 1 м від автодороги Р24, територія лісу на відстані 100–150 м від р. Лемиць і польового ґрунту на відстані 300 м від автодороги. Також було відібрано зразки мулу з річок Дністер, Лемиць і Дереновець. Відбір проводився в триразовій повторності для забезпечення точності відбору зразків. Вага проби ґрунтів та мулу становили 1 кг. Координати точок відбору ґрунту фіксувалися за допомогою GPS картографування (рис. 1).

Дослідження проводились на базі Української лабораторії якості і безпеки продукції АПК НУБіП України, яка акредитована згідно з міжнародною системою якості ДСТУ ISO/IEC 17025:2019 для визначення показників родючості ґрунтів та досліджень на вміст ПАВ.

Визначення реакції ґрунтового середовища pH проводили за ДСТУ ISO 10390:2022 Ґрунт, оброблені біовідходи та осад; вмісту амонійного та нітратного азоту згідно з ДСТУ 4729:2007 Якість ґрунту. Визначення нітратного і амонійного азоту в модифікації ННЦ ІГА ім. О.Н. Соколовського та органічної речовини (гумусу) за ДСТУ 4289:2004 Якість ґрунту. Методи визначення органічної речовини, пункт 8.1, а дослідження на вміст поліароматичних вуглеводнів за методикою відповідно до ДСТУ ISO 13877:2005.

**Результати**

Усі зразки характеризуються нейтральною та лужною реакцією середовища: 7,9–8,3 одиниць pH. Найвищі показники pH водної витяжки, зафіксовані у зразку ґрунту, відібраному в с. Стрільче на відстані 150 м від р. Лемиць, становили 8,3, тоді як найнижчий показник спостерігався поблизу автодороги Р24 – 7,9 одиниць pH (табл. 1).

Вміст нітратного азоту коливався у межах від 6,3 до 18,3 мг/кг. Найвищі показники встановлено у зразках ґрунту, відібраних на відстані 1 м від автодороги Р24, тоді як найнижчий рівень (6,3 мг/кг) відзначено у ґрунті на березі р. Лемиць. Вміст амонійного азоту суттєво варіював: з максимального значення 67,0 мг/кг у мулі р. Дністер, до найменшого – 6,7 мг/кг – у ґрунті, відібраному в с. Стрільче за 150 м від р. Лемиць.

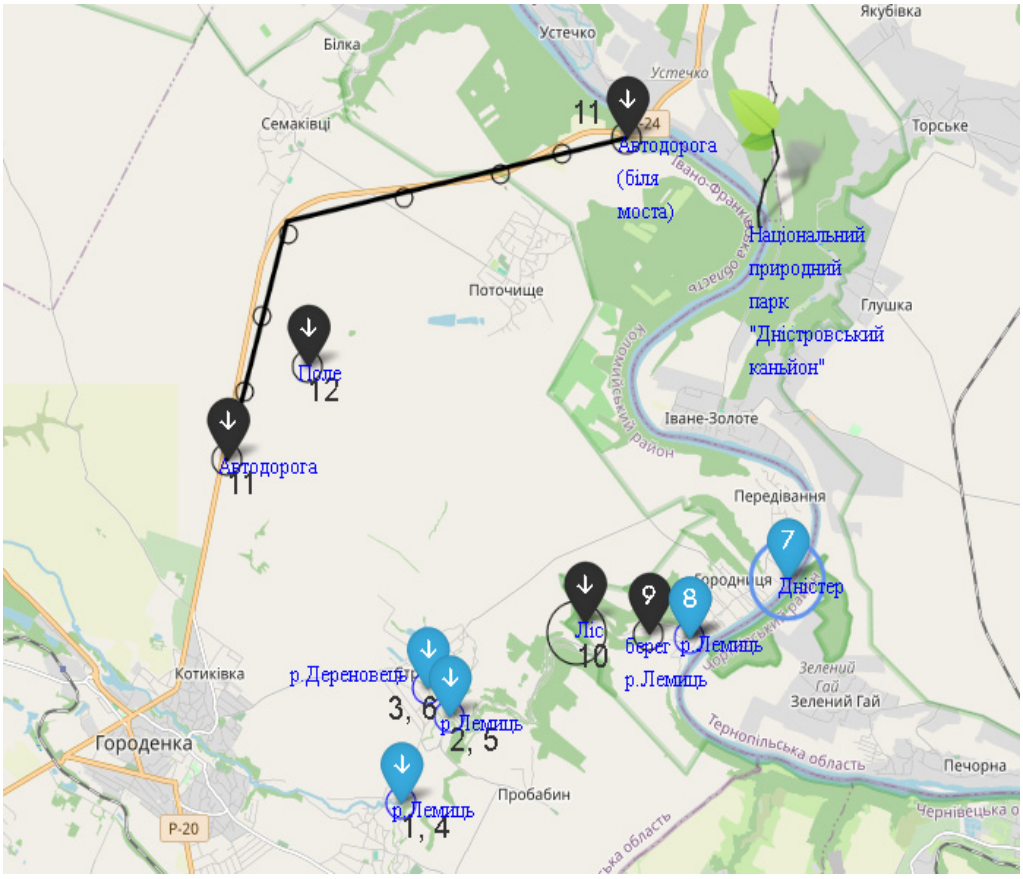



**Рис. 1. Карта відбору зразків на прилеглій до Дністровського каньйону території і в річці Дністер: синім кольором позначено локації відбору річкового осаду (1, 2, 3); чорним кольором – зразків ґрунту (глибина 15 см). Цифрами вказано номери об'єднаних проб, кругами – обведено територію, в межах якої проводились окремі відбори зразків; лініями позначено протяжність автодороги з місця початку і закінчення відбору зразків ґрунту (2 м від автодороги, об'єднаний зразок 11)**

Вміст гумусу у досліджених зразках коливався від 1,84 до 7,00 %. Найвищий рівень органічної речовини визначено у ґрунті біля автодороги Р24, що може бути зумовлено накопиченням органічних залишків у заболочених умовах. Найнижчий вміст гумусу – 1,8 % характерний для ґрунту з берега р. Лемиць та становив. Вміст гумусу в мулі р. Дністер та р. Лемиць становив 3,63 та 3,29 % відповідно.

Отримані дані аналізу свідчать про значні просторові відмінності у вмісті елементів живлення та органічної речовини, що зумовлено як природними факторами (походженням мулу, віддаленістю від водного об'єкта), так і антропогенним навантаженням.

***Таблиця 1***

**Характеристика ґрунтів та мулу за основними агрохімічними показниками залежно від місця розташування**

| Локація | Реакція ґрунтового середовища, pH водної витяжки | $N\text{-}NO_3$, мг/кг | $N\text{-}NH_4$, мг/кг | Вміст мінерального азоту, мг/кг | Вміст гумусу, % |
|---|---|---|---|---|---|
| р. Дністер, (річковий мул) | 7,9±0,2 | 9,84 | 67,0 | 76,8 | 3,63 |
| р. Лемиць, (річковий мул) | 7,9±0,2 | 6,80 | 38,7 | 45,5 | 3,29 |
| р. Лемиць (ґрунт на березі річки) | 8,2±0,2 | 6,29 | 18,5 | 24,8 | 1,84 |
| с. Стрільче (ґрунт 150 м від р. Лемиць | 8,3±0,2 | 8,94 | 6,7 | 15,6 | 1,99 |
| Автодорога Р24, (ґрунт 1 м від дороги) | 7,9±0,2 | 18,33 | 17,8 | 36,1 | 7,00 |

Також відібрані зразки було досліджено на вміст ПАВ. У значних кількостях виявлено наявність флуорантену та пірену (2,255 і 2,417 мг/кг відповідно) в об'єднаних пробах мулів, відібраних до очисних споруд у р. Лемиць; ці ж компоненти виявлено в об'єднаних пробах мулів р. Дереновець – 2,040 і 2,087 мг/кг відповідно.

В об'єднаних пробах поверхневого ґрунту та річкового осаду, відібраних на територіях, позначених на карті, сума концентрації ПАВ була найнижчою в лісовому ґрунті (103 мкг/кг) (рис. 2).

У пробі річкового осаду р. Дністер сумарна концентрація 15 ПАВ становила 449 мкг/кг. У пробах річкового осаду річок Лемиць і Дереновець, у напрямку від населених пунктів с. Стрільче і с. Серафинці до Дністра, виявлена загальна концентрація ПАВ була значно вищою, ніж у р. Дністер. Вона знижувалася в цьому напрямку з максимальної 11471 мкг/кг (проби відібрано до очисних споруд) до 2005 мкг/кг.

ISSN 1728-3817

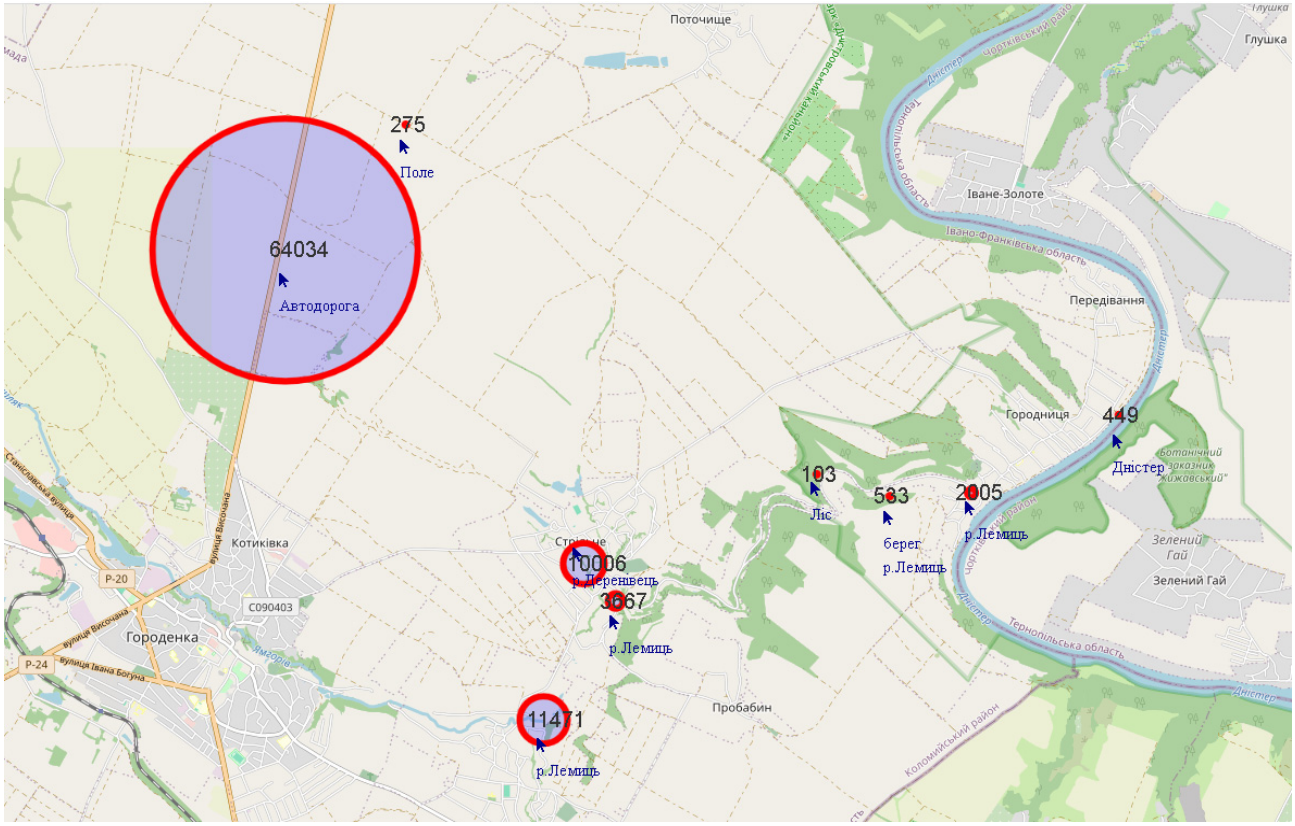



**Рис. 2. Концентрації суми 15 ПАВ (значення вказано на карті у мкг/кг), визначені в об'єднаних зразках ґрунту і річкового осаду з різних локацій**

На березі р. Лемиць у ґрунті вона становила 583 мкг/кг. Висока концентрація ПАВ в окремих пробах річкового осаду р. Лемиць і р. Дереновець може бути зумовлена близькістю їх до автодоріг і населених пунктів, а активне їх накопичення – повільною біодеградацію цих сполук у річковому осаді. Найвищою концентрація суми ПАВ (64,034 мг/кг) була виявлена у ґрунті придорожньої смуги автомобільної дороги регіонального значення Р24. У пробах польового ґрунту біля цієї автодороги вона була значно нижчою – 275 мкг/кг. За даними подібних досліджень у різних країнах, найвищі концентрації ПАВ було виявлено в межах кількох метрів від доріг із різким зниженням концентрацій за межами цієї відстані (Clement et al., 2015; Dierkes, & Geiger, 1999), що узгоджується і з нашими результатами. Геологічна служба США (USGS) проводила масштабне дослідження впливу використання герметиків на основі кам'яновугільної смоли в дорожніх покриттях, оскільки вони вважаються основним джерелом забруднення поліциклічними ароматичними вуглеводнями у міських районах і є основною причиною тенденції до зростання їх концентрації в осадових відкладеннях міських озер (U.S. Geological Survey, 2011; Watts et al., 2010). Загальний вміст ПАВ в окремих пробах досить високий через близькість до джерел забруднення (транспорт, комунальні стоки) і властивість накопичуватися в осаді окремих водойм. У донному осаді р. Дністер сума 16 ПАВ була значно нижчою, ніж у пробах малих річок, які було відібрано ближче до джерел комунальних стоків і доріг. Вміст бенз(а)пірену в Дністрі визначено на рівні 28,3 мкг/кг. У пробах польового ґрунту концентрацію бенз(а)пірену зафіксовано на рівні 9,29 мкг/кг, а в лісовому ґрунті біля річки (50–100 м від берега річки) – 3,96 мкг/кг, що є нижчими значеннями від гранично допустимої концентрації (ГДК), яка в Україні регламентується на рівні 20 мкг/кг (Кабінет Міністрів України, 2025).

У всіх досліджених пробах ґрунту і річкового осаду переважали концентрації 4-кільцевих ПАВ (флуорантен, пірен, хризен, бенз(а)антрацен), лише у пробах поля і в умовах лісу в ґрунті виявлено вищий відсоток 2-кільцевого нафталену і 3-кільцевих ПАВ (аценафтен, флуорен, антрацен фенатрен) (рис. 3).

Домінування 4–5-кільцевих ПАВ (флуорантен, пірен, хризен, бенз(а)антрацен бензо(b)флуорантен, бензо(k)флуорантен, бензо(а)пірен) вказує на тривалий вплив джерел забруднення і накопичення цих речовин у ґрунті, що узгоджується з даними інших досліджень (Ciarkowska, de Carvalho, & Gambus, 2022; Kim et al., 2019). Через розчинність у воді 2-кільцеві ПАВ, і меншою мірою 3-кільцеві ПАВ, є більш доступними для біологічного розкладу та поглинання, тому з часом їх кількість зменшується (Choi et al., 2010).

В об'єднаних пробах ґрунту, відібраних на відстані 1 м біля автодороги Р24, вміст флуорантену і пірену виявляли на рівні 16,630 та 15,718 мг/кг відповідно. У цих пробах також виявлено значну кількість фенантрену – 8,777 мг/кг, бенз(а)нтрацену (4,054 мг/кг), хризену (4,479 мг/кг), бенз(б)флуорантену (3,836 мг/кг), бенз(к)флуорантену (1,783 мг/кг), бенз(g,h,i)перилену (1,873 мг/кг), індено(1,2,3-cd)пірену (1,654 мг/кг), а також бенз(а)пірену – 2,592 (за його гранично допустимої концентрації у ґрунтах 0,02 мг/кг). Найвищий вміст гумусу в цій пробі сприяв фіксації ПАВ. У пробах придорожнього ґрунту також було виявлено такі компоненти, як нафтален, аценафтен, флуорен, антрацен та дибенз(a,h)антрацен, але у значно менших концентраціях (0,316–0,754 мг/кг). У ґрунтах, відібраних на відстані 300 м від автодороги, виявляли незначний вміст усіх 15 ПАВ. Їх концентрація не перевищувала 0,02 мг/кг, за винятком вмісту нафталену (0,029 мг/кг).

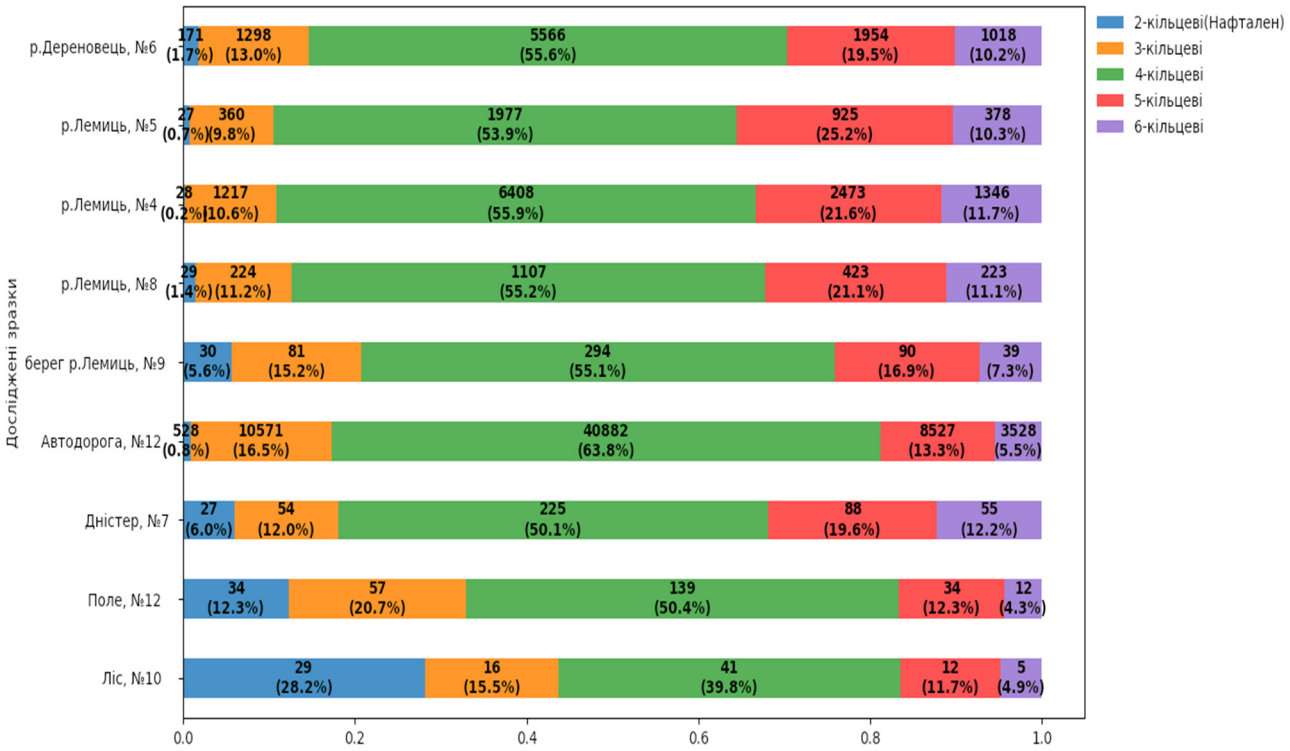



**Рис. 3. Співвідношення різного типу ПАВ (залежно від кількості кілець у молекулі) у досліджених зразках ґрунту та річкового осаду (значення вказано на карті у мкг/кг та відсотках від загальної концентрації 15 ПАВ)**

## Дискусія і висновки

Найвищі показники забруднення ПАВ спостерігали локально у місцях їх накопичення, на обочині доріг з активним рухом транспорту, а також у донних відкладах малих річок, що протікають близько до населених пунктів. Більший вміст у ґрунті органічної речовини, понижена форма рельєфу сприяла фіксації та накопиченню ПАВ. Фонове забруднення ґрунтів на територіях, розташованих на відстані 300 м від джерел забруднень (автодоріг) 15 ПАВ та лісовому ґрунті, відповідає гігієнічним нормам.

Висока концентрація ПАВ в окремих пробах річкового осаду р. Лемиць (до і після очисних споруд у різних локаціях – 2005–11471 мкг/кг) та р. Дереновець (10006 мкг/кг), якщо порівнювати з р. Дністер (449 мкг/кг), може бути зумовлена близькістю річок до автодоріг і населених пунктів. Іншою причиною є активне накопичення ПАВ через повільну біодеградацію зазначених сполук у річковому осаді цих річок.

На перспективу доцільно провести дослідження територій цієї місцевості на визначення інших потенційно небезпечних екологічних токсикантів, таких як важкі метали та поліхлоровані біфеніли.

**Внесок авторів:** Олексій Березовський – методологія, валідація даних, аналіз; Світлана Мідик – обробка даних, методологія, написання (оригінальна чернетка); Валентина Корнієнко – методологія, валідація даних, аналіз; Оксана Самкова – концептуалізація, методологія; Оксана Тонха – концептуалізація, методологія; Юрій Вішован – аналіз і обробка даних, програмне забезпечення, формальний аналіз; Лариса Семенко – аналіз і обробка даних, програмне забезпечення, формальний аналіз; Максим Смирний – аналіз і обробка даних, написання (перегляд і редагування).

**Джерела фінансування.** Це дослідження не отримало жодного гранту від фінансової установи в державному, комерційному або некомерційному секторах.

**Список використаних джерел**

Адаменко, О. М., Зорін, Д. О., & Мосюк, М. І. (2020). Стан довкілля території Дністровського регіонального ландшафтного парку. *Вісник Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 53, 227–238.

Березовський, О. В., Мідик, С. В., Корнієнко, В. І., Хижняк, С. В., Таран, Т. В., & Полтавченко, Т. В. (2025). Хроматографічні методи визначення поліциклічних ароматичних вуглеводнів у компонентах екосистем. *Таврійський науковий вісник*, 142(1), 282–290. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.1.35

Войціцький, В. М., Хижняк, С. В., Мідик, С. В., Березовський, О. В., Якубчак, О. М., & Полтавченко, Т. В. (2022). Шляхи міграції поліциклічних ароматичних вуглеводнів наземними і водними екосистемами. *Екологічні науки*, 3(42), 14–20.

Дегодюк, С., Бутенко, А., Давидюк, Г., Гаврилюк, О., Клименко, І., Літвінов, Д., Літвінова, О., & Тонха, О. (2024). Агроекологічний моніторинг водних екосистем та ґрунтів у басейні малої річки під впливом антропогенних факторів. *Сільське та лісове господарство*, 70(4), 109–135. https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.4.09

Денисик, Г. І. (1996). Край каньйонів – Середнє Придністров'я. *Український географічний журнал*, 3, 60–63.

Кабінет Міністрів України. (2025). *Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин.* Постанова № 1325 від 15.12.2025. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text

Choi, H., Harrison, R., Komulainen, H., & Delgado, S. J. M. (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons. In *WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. World Health Organization.

Ciarkowska, K., de Carvalho, M., & Gambus, F. (2022). Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Sources and Vertical Distribution in Soils of the Age-Diverse Brownfields of Southern Poland Using Positive Matrix Factorisation and Data Mining Model. *Sustainability*, 14(21), 13796. https://doi.org/10.3390/su142113796

Clement, N., Muresan, B., Hedde, M., & Francois, D. (2015). PAH dynamics in roadside environments: Influence on the consistency of diagnostic ratio values and ecosystem contamination assessments. *Science of the Total Environment*, 538, 997–1009.

Da Silva Junior, F. C., Felipe, M. B. M. C., Castro, D. E. F., Araújo, S. C. D. S., Sisenando, H. C. N., & Batistuzzo de Medeiros, S. R. (2021). A look beyond the priority: a systematic review of the genotoxic, mutagenic, and carcinogenic endpoints of non-priority PAHs. *Environmental Pollution*, 278, 116838. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116838

Dierkes, C., & Geiger, W. F. (1999). Pollution Retention Capabilities of Roadside Soils. *Water Science and Technology*, 39(2), 201–208.

Froger, C., Saby, N. P. A., Jolivet, C. C., Boulonne, L., Caria, G., Freulon, X., de Fouquet, C., Roussel, H., Marot, F., & Bispo, A. (2021). Spatial variations,

origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *Soil*, 7, 161–178. https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021

Kim, L., Jeon, H.-J., Kim, Y.-C., Yang, S.-H., Choi, H., Kim, T.-O., & Lee, S.-E. (2019). Monitoring Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations and Distributions in Rice Paddy Soils from Gyeonggi-Do, Ulsan, and Pohang. *Applied Biological Chemistry*, 62, 18.

Mallah, M. A., Changxing, L., Mallah, M. A., Noreen, S., Liu, Y., & Saeed, M. (2022). Polycyclic Aromatic Hydrocarbon and Its Effects on Human Health: An Overeview. *Chemosphere*, 296, Article 133948. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.133948

Menshov, A. I., Kruglov, A. V., & Sukhorada, A. V. (2012). Informational content of the soil magnetism indicators for solving agrogeophysics and soil science tasks. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 7–12.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenigy, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750.

Menshov, O., Sukhorada, A., Homenko, R., & Kruglov, O. (2012). Ultradetailed environmental magnetic investigations in Ukraine. In *Near Surface Geoscience 2012–18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (pp. cp-306). European Association of Geoscientists & Engineers.

Sun, K., Song, Y., He, F., Jing, M., Tang, J., & Liu, R. (2021). A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics. *Science of the Total Environment*, 773, 145403. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403

U.S. Environmental Protection Agency. (1979). Priority pollutant list. *Federal Register*, 44, 69514–69517.

United States Geological Survey. (2011). *Coal-Tar Based Pavement Sealcoat, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), and Environmental Health* (Fact Sheet 2011-3010). https://pubs.usgs.gov/fs/2011/ 3010/pdf/fs2011-3010.pdf

Veremeenko, S., Furmanets, O., Semenko, L., Bykina, N., & Bobkov, V. (2021). Influence of climate changes on hydrothermal regime of dark gray podzolized soil of Western Forest Steppe. *Scientific Horizons*, 24(12), 46–54. https://doi.org/10.48077/scihor.24(12).2021.46-54

Wang, J., Zhao, Y., Sun, J., Zhang, Y., & Liu, C. (2019). The distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in shallow ground water from an alluvial-diluvial fan of the Hutuo River in North China. *Frontiers of Earth Science*, 13, 33–42.

Watts, A. W., Ballestero, T. P., Roseen, R. M., & Houle, J. P. (2010). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Stormwater Runoff from Sealcoated Pavements. *Environmental Science & Technology*, 44(23), 8849–8854.

Zhang, Y., & Zhang, F. (2023). Skin toxicity mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chinese Journal of Industrial Medicine*, 36(3), 231–234. https://doi.org/10.13631/j.cnki.zggyyx.2023.03.010

Zhao, Z. Y., Chu, Y. L., & Gu, J. D. (2012). Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Mai Po Inner Deep Bay Ramsar Site in Hong Kong. *Ecotoxicology*, 21(6), 1743–1752.

**References**

Adamenko, O. M., Zorin, D. O., & Mosyuk, M. I. (2020). Environmental condition of the territory of the Dniester Regional Landscape Park. *Bulletin of the V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, 53, 227–238 [in Ukrainian].

Berezovsky, O. V., Midyk, S. V., Kornienko, V. I., Khyzhnyak, S. V., Taran, T. V., & Poltavchenko, T. V. (2025). Chromatographic methods for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in ecosystem components. *Tavria Scientific Bulletin*, 142(1), 282–290 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.142.1.35

Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025). *On approval of the standards for maximum permissible concentrations of hazardous substances in soils, as well as the list of such substances.* Resolution No. 1325 of 15.12.2025 [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1325-2021-%D0%BF#Text

Choi, H., Harrison, R., Komulainen, H., & Delgado, S. J. M. (2010). Polycyclic aromatic hydrocarbons. In *WHO guidelines for indoor air quality: Selected pollutants*. World Health Organization.

Ciarkowska, K., de Carvalho, M., & Gambus, F. (2022). Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Sources and Vertical Distribution in Soils of the Age-Diverse Brownfields of Southern Poland Using Positive Matrix Factorisation and Data Mining Model. *Sustainability*, 14(21), 13796. https://doi.org/10.3390/su142113796

Clement, N., Muresan, B., Hedde, M., & Francois, D. (2015). PAH dynamics in roadside environments: Influence on the consistency of diagnostic ratio values and ecosystem contamination assessments. *Science of the Total Environment*, 538, 997–1009.

Da Silva Junior, F. C., Felipe, M. B. M. C., Castro, D. E. F., Araújo, S. C. D. S., Sisenando, H. C. N., & Batistuzzo de Medeiros, S. R. (2021). A look beyond the priority: a systematic review of the genotoxic, mutagenic, and carcinogenic endpoints of non-priority PAHs. *Environmental Pollution*, 278, 116838. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116838

Degodyuk, S., Butenko, A., Davydyuk, G., Gavrilyuk, O., Klymenko, I., Litvinov, D., Litvinova, O., & Tonkha, O. (2024). Agroecological monitoring of aquatic ecosystems and soils in the small river basin under the influence of anthropogenic factors. *Agriculture and Forestry*, 70(4), 109–135 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.4.09

Denisyk, G. I. (1996). The Land of Canyons – Middle Transnistria. *Ukrainian Geographical Journal*, 3, 60–63 [in Ukrainian].

Dierkes, C., & Geiger, W. F. (1999). Pollution Retention Capabilities of Roadside Soils. *Water Science and Technology*, 39(2), 201–208.

Froger, C., Saby, N. P. A., Jolivet, C. C., Boulonne, L., Caria, G., Freulon, X., de Fouquet, C., Roussel, H., Marot, F., & Bispo, A. (2021). Spatial variations, origins, and risk assessments of polycyclic aromatic hydrocarbons in French soils. *Soil*, 7, 161–178. https://doi.org/10.5194/soil-7-161-2021

Kim, L., Jeon, H.-J., Kim, Y.-C., Yang, S.-H., Choi, H., Kim, T.-O., & Lee, S.-E. (2019). Monitoring Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Concentrations and Distributions in Rice Paddy Soils from Gyeonggi-Do, Ulsan, and Pohang. *Applied Biological Chemistry*, 62, 18.

Mallah, M. A., Changxing, L., Mallah, M. A., Noreen, S., Liu, Y., & Saeed, M. (2022). Polycyclic aromatic hydrocarbon and its effects on human health: An overeview. *Chemosphere*, 296, Article 133948. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.133948

Menshov, A. I., Kruglov, A. V., & Sukhorada, A. V. (2012). Informational content of the soil magnetism indicators for solving agrogeophysics and soil science tasks. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 7–12.

Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Pereira, P., Pastushenko, T., & Dindaroglu, T. (2021). Landscape position effects on magnetic properties of soils in the agricultural land Pechenigy, Ukraine. *Earth Systems and Environment*, 5(3), 739–750.

Menshov, O., Sukhorada, A., Homenko, R., & Kruglov, O. (2012). Ultradetailed environmental magnetic investigations in Ukraine. In *Near Surface Geoscience 2012–18th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics* (pp. cp-306). European Association of Geoscientists & Engineers.

Sun, K., Song, Y., He, F., Jing, M., Tang, J., & Liu, R. (2021). A review of human and animals exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons: Health risk and adverse effects, photo-induced toxicity and regulating effect of microplastics. *Science of the Total Environment*, 773, 145403. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145403

U.S. Environmental Protection Agency. (1979). Priority pollutant list. *Federal Register*, 44, 69514–69517.

United States Geological Survey. (2011). *Coal-Tar Based Pavement Sealcoat, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), and Environmental Health* (Fact Sheet 2011-3010). https://pubs.usgs.gov/fs/2011/3010/pdf/fs2011-3010.pdf

Veremeenko, S., Furmanets, O., Semenko, L., Bykina, N., & Bobkov, V. (2021). Influence of climate changes on hydrothermal regime of dark gray podzolized soil of Western Forest Steppe. *Scientific Horizons*, 24(12), 46–54. https://doi.org/10.48077/scihor.24(12).2021.46-54

Voytsitsky, V. M., Khizhnyak, S. V., Midyk, S. V., Berezovsky, O. V., Yakubchak, O. M., & Poltavchenko, T. V. (2022). Paths of migration of polycyclic aromatic hydrocarbons through terrestrial and aquatic ecosystems. *Ecological sciences*, 3(42), 14–20.

Wang, J., Zhao, Y., Sun, J., Zhang, Y., & Liu, C. (2019). The distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in shallow ground water from an alluvial-diluvial fan of the Hutuo River in North China. *Frontiers of Earth Science*, 13, 33–42.

Watts, A. W., Ballestero, T. P., Roseen, R. M., & Houle, J. P. (2010). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Stormwater Runoff from Sealcoated Pavements. *Environmental Science & Technology*, 44(23), 8849–8854.

Zhang, Y., & Zhang, F. (2023). Skin toxicity mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Chinese Journal of Industrial Medicine*, 36(3), 231–234. https://doi.org/10.13631/j.cnki.zggyyx.2023.03.010

Zhao, Z. Y., Chu, Y. L., & Gu, J. D. (2012). Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Mai Po Inner Deep Bay Ramsar Site in Hong Kong. *Ecotoxicology*, 21(6), 1743–1752.

**Отримано редакцією журналу / Received: 25.09.25**
**Прорецензовано / Revised: 06.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Oleksii BEREZOVSKIY[1], PhD (Agricultural)**
**ORCID ID: 0000-0002-0909-1119**
**e-mail: ol11111bz@gmail.com**

**Svitlana MIDYK[1], PhD (Veterinary)**
**ORCID ID: 0000-0002-2682-2884**
**e-mail: svit.mid@gmail.com**

**Valentina KORNIYENKO[1,2], DSc (Biol.), Prof.**
**ORCID ID: 0000-0003-0403-7727**
**e-mail: kornienko-valentina1966@ukr.net**

**Oksana SAMKOVA[2]**
**ORCID ID: 0000-0002-2132-3357**
**e-mail: samkova_op@ukr.net**

**Oksana TONKHA[1], DSc (Agricultural), Prof.**
**ORCID ID: 0000-0002-0677-5494**
**e-mail: tonkha.o@nubip.edu.ua**

**Yurii VISHOVAN[1], PhD**
**ORCID ID: 0000-0003-1128-593X**
**e-mail: anatomi1991@gmail.com**

**Larysa SEMENKO[1], PhD (Agricultural)**
**ORCID ID: 0000-0002-4586-3681**
**e-mail: Larisa-s@ukr.net**

**Maksym SMYRNYY[3], PhD Student**
**ORCID ID: 0009-0000-1274-6596**
**e-mail: maksim.smirnyy@gmail.com**

**[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine**
**[2]Ukrainian Laboratory of Quality and Safety of Agricultural Products, Kyiv, Ukraine**
**[3]M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine**

## ASSESSMENT OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBON POLLUTION IN THE SLUDGE AND SOIL OF THE DNISTROVA CANYON WITHIN THE BOUNDARIES OF THE HORODENKIV TERRITORIAL COMMUNITY

**Background.** *An assessment of the state of pollution by ecotoxicants of soils and river sediments in the territory of the Horodenkiv territorial community, adjacent to the Dniester Regional Landscape Park (RLP) and located on the right bank of the Dniester River, was carried out.*

**Methods.** *High-performance liquid chromatography (HPLC) was used to analyze samples of silt and soil for the content of 15 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): naphthalene, acenaphthene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, benz(a)anthracene, chrysene, benz(b)fluoranthene, benz(k)fluoranthene, benz(a)pyrene, dibenz(a,h)anthracene, benz(g,h,i)perylene, indeno(1,2,3-cd)pyrene. Sampling was carried out in locations in Kolomyia district, Ivano-Frankivsk region, which are remote from pollution sources (background content of pollutants) and directly near pollution sources (highways, wastewater).*

**Results.** *Among all the selected samples of surface soil and river sediment, the sum of the concentration of 15 PAHs was the lowest in forest soil (103 μg/kg). In the sample of river sediment of the Dniester River, the total concentration was 449 μg/kg. In the samples of river sediment of the Lemyts and Derenovets rivers, in the direction from the settlements of the village of Strilche and the village of Serafyntsi to the Dniester, the total concentration of PAHs was significantly higher than in the Dniester River. It decreased in this direction from the maximum of 11471 μg/kg (samples taken to treatment facilities) to 2005 μg/kg. On the banks of the Lemyts River it was 583 μg/kg in the soil.*

**Conclusions.** *The high concentration of PAHs in individual samples of river sediment of the Lemyts River and the Derenovets River may be due to their proximity to roads and settlements, their active accumulation due to the slow biodegradation of these compounds in the river sediment. The highest concentration of the total PAHs (64.034 mg/kg) was found in the soil on the side of the regional road P24. In soil samples taken at a distance of 300 m from this road, a small content of all 15 PAHs (275 μg/kg) with a benzo(a)pyrene concentration of 9.29 μg/kg was found, which are lower values than the maximum permissible concentration (20 μg/kg). The dominance of 4–5-ring surfactants (fluoranthene, pyrene, chrysene, benz(a)anthracene, benzo(b)fluoranthene, benzo(k)fluoranthene, benzo(a)pyrene) indicates the long-term impact of pollution sources and the accumulation of these substances in the soil.*

**Keywords:** *Dniester Canyon, soils, polyaromatic hydrocarbons, technogenic pollution, military actions.*

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

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

# ГЕОЛОГІЯ НАФТИ І ГАЗУ

UDC 553.06 (479.24)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.08

Sudaba ALIYEVA, PhD (Geol. & Mineral.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-7059-0868
e-mail: sudali58@gmail.com
Azerbaijan State of Oil and Industry University, 34 Azadlig Ave., Baku, Azerbaijan

## GEODYNAMIC AND PALEOTECTONIC ANALYSIS OF THE SOUTH CASPIAN MEGADEPRESSION IN CONNECTION WITH OIL AND GAS PROSPECTS (USING THE EXAMPLE OF THE YEVLAKH-AGJABEDI DEPRESSION)

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. Володимиром МИХАЙЛОВИМ)*

**Background.** *When assessing the prospects for oil and gas potential, the most important task is to determine the genetic affiliation of the sedimentary basin, i. e. type of geodynamic regime. In this regard, this article devoted to the geodynamic evolution of the Caspian Basin is relevant. The work analyzed data from published works on the geodynamic evolution of the above-mentioned territory.*

*From the standpoint of global plate tectonics, high oil and gas potential is associated primarily with continental margins, paleorift basins, zones of intermontane and foredeeps formed during the final stage of plate collision, as well as with thrust margins of folded mountain structures.*

*The determining factor in oil and gas formation is, first of all, the geodynamic regime of the subsoil, and therefore, when assessing the prospects for oil and gas content, the primary task is to determine the genetic affiliation of the sedimentary basin, i. e. type of geodynamic regime. When determining the genotype of a sedimentary basin, an extremely important parameter is the type of consolidated crust, which is associated not only with the amplitude of tectonic subsidence and, consequently, the rate of sedimentation, the thickness of the sedimentary cover, but also the magnitude of the heat flow, which determines the conditions of oil and gas formation.*

**Results.** *As a result of the analysis of the main criteria of oil and gas potential, we associate the greatest prospects with the NE side part of the Yevlakh-Agjabedi depression region and its north-eastern section of the SE centricolinal closure, where the articulation of the said depression with the slopes of the Geokchay-Mingachevir, Saatly-Kurdamir and Bilasuvar-Karadonly Mesozoic protrusions occurs. The probable zone of oil and gas formation, which served as a source of hydrocarbon fluids for the regional oil accumulation zone under consideration, was the central part of the Yevlakh-Agjabedi trough, where, during most of the Mesozoic-Cenozoic history, there was a steady subsidence and accumulation of a thick layer of Eocene deposits, from where oil migrated into lithological-stratigraphic traps, confined to the zone of unconformable adjacency of Eocene terrigenous-carbonate reservoirs to the eroded surface of Upper Cretaceous effusive formations.*

**Conclusions.** *The formation of lithological oil deposits in zones of increased fracturing of the regolith surface of the Upper Cretaceous effusive rocks – in the crest of the uplift – occurred as a result of lateral migration and partial flow of oil from the Eocene reservoirs of the south-west wing and south-east pericline – along weathering zones and cracks.*

**Keywords:** *South Caspian Plate, lithospheric plate, geodynamic regime, East European Plate, sedimentary basin, hydrocarbon potential, Yevlakh-Agjabedi region, Muradkhanli oil and gas accumulation zone, non-structural traps, reservoirs, seals.*

### Background

The formation and development of sedimentary basins is an integral part of the overall global evolution of the lithosphere. Only within the framework of the global evolution of the lithosphere can one understand the conditions for the emergence and the nature of further transformations of a sedimentary basin at various stages of geological history, the result of which is a modern oil and gas sedimentary basin. Each stage of the evolution of the lithosphere corresponds to very specific tectonic types of sedimentary basins, the formation of which is determined by the prevailing geotectonic (extension, compression, "passive" subsidence) and thermal regimes at this stage. This, in turn, determines the geological parameters characteristic of this type of basin – type of crust, rates of subsidence and sedimentation, lithological-facies character and thickness of sedimentary infill, geothermal gradients, nature of deformations and types of traps, conditions of accumulation, burial and transformation of organic matter (OM), types of oil and gas source rocks, reservoirs and seals, scale of generation and migration routes of hydrocarbons, location and nature of regional oil and gas accumulation zones.

Most existing sedimentary oil and gas basins have gone through several stages of development. Usually, during the transition from one stage to another, a new one appears in place of the previous sedimentary basin – of a different tectonic type, with its own structural features, thermobaric conditions, etc. Vertical superposition and (or) lateral conjugation of sedimentary basins (or parts thereof), corresponding to successive stages of evolution, lead to the formation of the resulting sedimentary basin with a much more complex geological structure. In the context of such basins, relics of various previous stages form independent structural floors. In addition, they can participate in the structure of the foundation of the basin or in its framing.

Basins with the most complex structure and long evolution turn out to be the most highly productive in terms of hydrocarbons.

Each stage contributes to the total hydrocarbon potential of the resulting basin. It is obvious that the last stage of evolution has a decisive influence on the structure and features of the placement of hydrocarbons in any modern sedimentary basin. However, in the lower structural levels corresponding to the basins (or parts thereof) of previous stages, the oil and gas conditions characteristic of this type of sedimentary rock basin can be largely preserved.

The basis for the geodynamic interpretation of sedimentary basins can be the mobilist concept of lithospheric plate tectonics. Based on this concept, (Kucheruk, & Alieva, 1983; Shikhlinskii, Kheirov, & Mustafayev, 1990; Shykhlinskiy, Kocharli, & Gadzhiev,

© Aliyeva Sudaba, 2025

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

1990) proposed a general scheme for the formation of the main types of sedimentary basins in a natural connection with certain stages of the evolution of the lithosphere.

In the proposed classification of sedimentary basins by tectonotypes from the position of mobilism, the Caspian Basin is classified as a group of internal seas that formed after the closure of marginal seas and the collision of lithospheric plates of the continent-arc type. For internal (formerly marginal) seas with their centriclinal intermontane depressions, the entire diversity of tectonic types of sedimentary basins can be represented as a single evolutionary series. It is based on the geotectonic cycle of the evolution of the lithosphere, which begins with the split of the continent, the opening of a marginal sea with oceanic crust, and the formation of its continental and island-arc margins and ending with plate collision and orogenesis in the process of compression, convergence and collision of plates and the formation of an intermountain basin with a residual deep-water basin.

**Results**

For a detailed study of the deep structure and evolution of the Caspian basin and a correct assessment of the oil and gas potential of its sedimentary strata, identifying favorable zones for the formation of traps (structural and non-structural) for hydrocarbons, it is necessary to find out not only its modern structure, but also its entire geological prehistory, i. e. identify the geodynamic regime and stages of formation of various paleotypes of basins with their characteristic sedimentary complexes, oil and gas accumulation zones and traps.

The Caspian basin, which finds itself at the center of the convergence of several plates with different kinematic parameters, is a heterogeneous structure of a very complex deep structure, where the junction of continental structures of different ages occurs: East European Precambrian platform, Scythian and Turanian epi-Paleozoic plates and Alpine folded structures in the south.

Three large geoblocks are distinguished within the contours of the Caspian Sea: the North Caspian, the Middle Caspian (a small fragment of the North Ustyurt geoblock is also considered in its composition) and the South Caspian. From the standpoint of the modern plate tectonic model, the presence of East European, Scythian, West Turanian, Lesser Caucasus, South Caspian and Iranian lithospheric mesoplates is recognized (Fig. 1, 2).

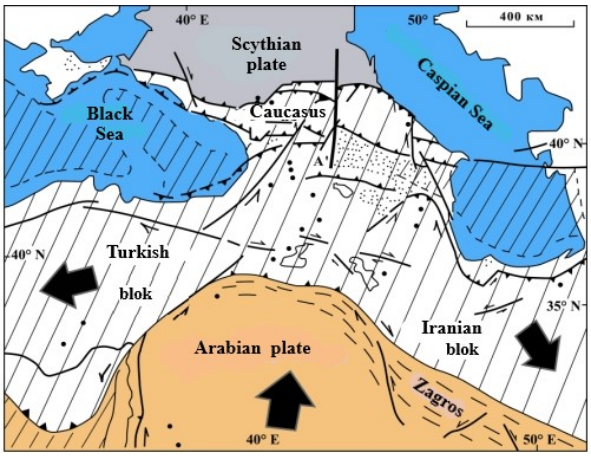



**Fig. 1. Scheme of tectonics of plate movement in the Black Sea-Caspian region and Transcaucasia (according to Sobornov, 1995)**

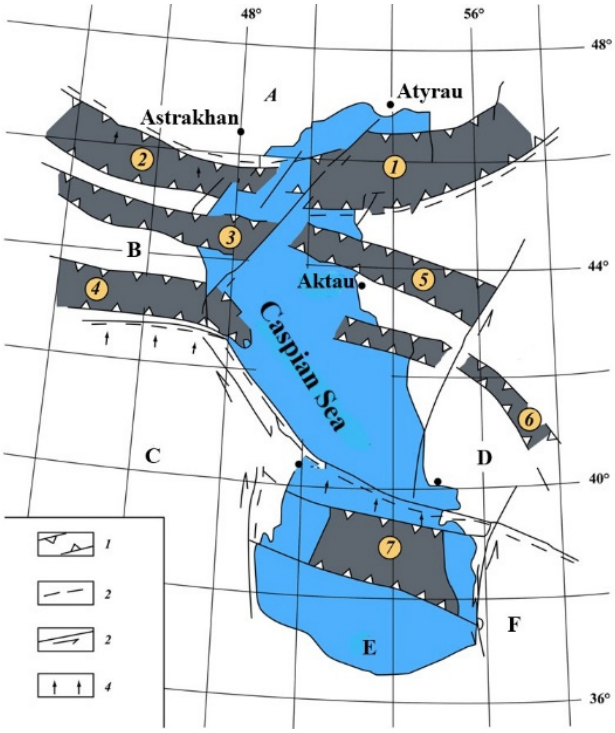



**Fig. 2. Scheme of geodynamic structures of the Caspian region:**
a – paleorifts (numbers in circles):
1 – South Emba (East European Platform); 2 – Karpinsky ridge;
3 – East Manychsky; 4 – Terek-Caspian (Scythian plate);
5 – Central Mangyshlak; 6 – Tuarkyr-Karaaudan (Turanian plate);
7 – South Caspian (Alpine folded region); 2 – mesoplate
boundaries–collision seams of platforms of different ages;
3 – sliding seams, shifts; 4 – subduction zones; mesoplates:
A – East European, B – Scythian, C – Lesser Caucasus,
D – Western Turanian, E – South Caspian, F – Iranian

These plates are very different in their structure, are in motion, and are not characterized by such a complex pattern of distribution of velocities and vectors of modern horizontal movements of individual blocks. Structures of different ages are confined to their boundaries – fragments of continental or suboceanic crust, which were influenced by subduction and collision during the closure of the Tethys paleoocean (Fig. 1, 3).

Since the late Miocene, the East European Plate has been considered inactive. The Scythian and Lesser Caucasus plates move along an azimuth of 18° at a speed of 1.92 cm/year and simultaneously rotate counterclockwise by $(2.03–10^{-7})°$. The West Turanian and Iranian mesoplates move to the northwest along collision sutures at a rate of 1.7 cm/year, and the South Caspian plate moves along an azimuth of 319° at a rate of 0.4 cm/year. Relative to the East European Plate, it rotates with an angular velocity of $(0.6 \cdot 10^{-7})°$ counterclockwise. Thus, the Caspian region found itself at the center of the convergence of several plates with different kinematic parameters. All this led to the complexity of the stage of geodynamic development and the coupling of different types of geostructural elements.

The South Caspian Basin (SCB), which includes the Kura, South Caspian and West Turkmen depressions, stretching in the sublatitudinal direction, in the north it is limited by the anticlinoria of the Greater Caucasus and Greater Balkhan, in the west – by the Dzirul massif, in the east – by the spurs of the Kopetdag, in the south – by the northern slopes of the Lesser Caucasus, Talysh and Elburz (Fig. 4).

ISSN 1728-3817

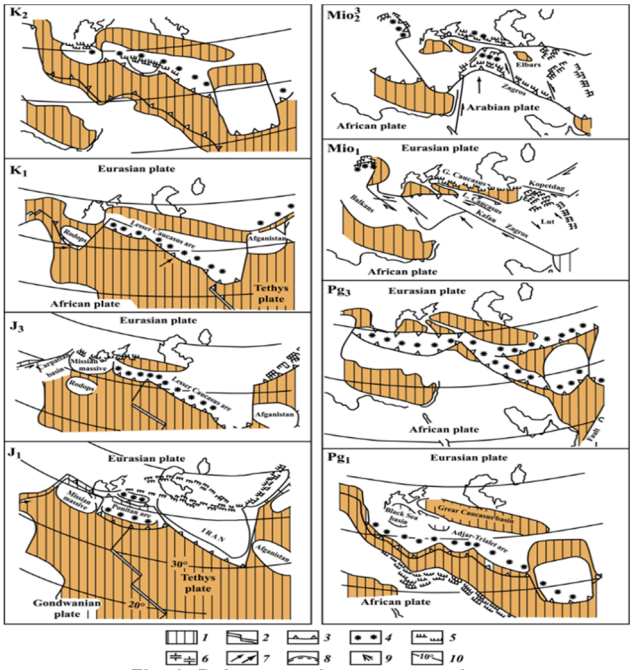



**Fig. 3. Paleotectonic reconstructions of the Tethys mobile zone (Zonenshein, Kuzmin, & Kononov, 1987):**
1 – oceanic crust; 2 – spreading axes;
3 – subduction zones (borders of plate convergence);
4 – volcanic arcs; 5 – folding and integumentation;
6 – continental rifts; 7 – direction of relative movement of slabs and microplates; 8 – contours of continents and microcontinents;
9 – underwater alluvial fans; 10 – paleolatitudes

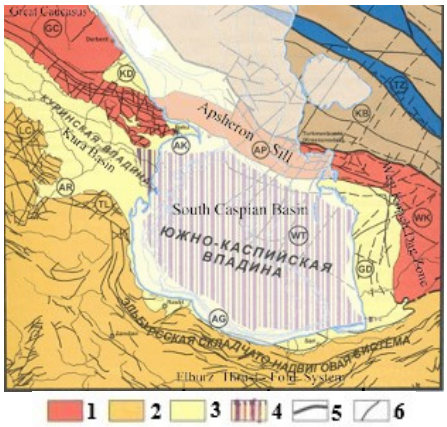



**Fig. 4. Tectonic map of the South Caspian Basin (Khain, & Bogdanov, 2003)**
Legends: The most important structural elements of the Caspian region: 1 – Greater Caucasus and Kopetdag;
2 – Lesser Caucasus, Talysh, Elbrus; 3 – Forward troughs and depressions; 4 – Depressions with oceanic crust;
5 – Discontinuous faults corresponding to the boundaries of large structures; 6 – Other important faults.
The most important structures (letters in circles):
GC – Greater Caucasus folded system;
KD – Kusaro-Divichi trough; AP – Apsheron-Pribalkhan zone;
WK – West Kopetdag zone; LC – Lesser Caucasus folded system;
AR – Lower Araks trough; TL – Talysh zone;
AG – Elburz-Gorgan foredeep; WT – West Turkmen trough;
GD – Gogran Dag-Okarem zone

It differs from the enormous thickness of the sedimentary cover – 25–30 km, against 12–17 km in other deep-sea basins of the Alpine-Himalayan mobile belt. The SCB is characterized by a reduction in the areas of shelf accumulation and a decrease in the overall size of the basin in the Cenozoic (Fig. 4, 5). The basin is declining especially rapidly in the Pliocene-Pleistocene, the reason for which is its location within a tectonic compression belt that experienced extreme crustal shortening in the late Cenozoic.

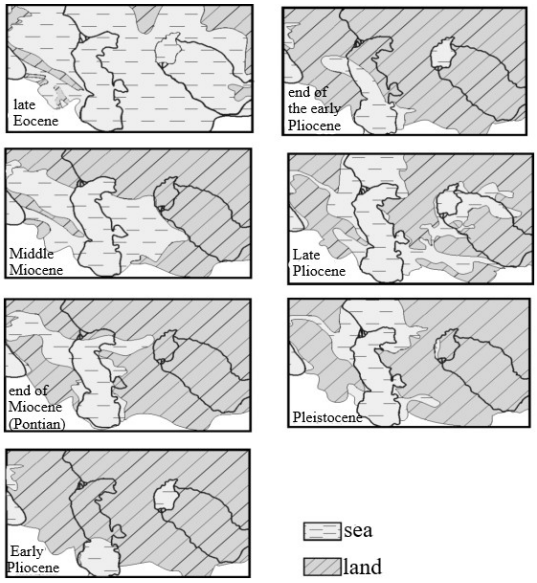



**Fig. 5. Paleogeography of the Eastern Paratethys in the Cenozoic (according to Nevesskaya et al.,1984, with additions from the authors)**

## Discussion and conclusions

According to the ideas (Adamia, Zakariadze, & Lordkipanidze, 1974; Bazhenov, & Shipunov, 1991; Gamkrelidze, 1988; Khain, & Sokolov, 1984; Knipper, Satian, & Bragin, 1997; Mamedov, 2006; Nevesskaya et al., 1984, 2003; Rustamov, 2005; Zonenshain, & Pichon, 1986; Zonenshain, 1990) in the geological past, on the site of the Caucasian-South Caspian segment of the Alpine-Himalayan belt, there was a complex of structures and geological bodies characteristic of the active margin of continents, consisting of the Lesser Caucasus branch of the Mesotethys ocean (relics of which are ophiolites), a volcanic island arc, a back-arc (marginal) Greater Caucasus Sea and passive elements on the edge of the Eurasian continental margin. These structures formed in the oceanic space of Mesotethys, where the Afro-Arabian and Eurasian platforms interacted with the microcontinents located between them (Anatolian, Iranian, South Caucasian, Nakhchivan, Maker, etc.). The tectonic evolution of this segment of the Alpine belt in the Mesozoic is characterized by the opening of the marginal Greater Caucasus Sea and the formation of the South Caucasus volcanic island arc, which many researchers associate with the subduction of the Mesotethys oceanic crust (Middle Jurassic – Early Cretaceous), its complete absorption in the Caucasian segment. The drift of the Afro-Arabian Platform to the north led to the closure of the Lesser Caucasus branch of the Mesotethys. The process of ocean closure began in the Senonian and was completed at the end of the Cretaceous (Zonenshain, 1990).

By the end of the Eocene in the Caucasus region, the entire crust of the Mesotethys ocean was completely absorbed, and there was a collision of the Anatolian and Iranian microcontinents with the Transcaucasian microcontinent located north of them and their pressing towards Eurasia.

As a result, compression structures of the Lesser and Greater Caucasus were formed, as well as the Eastern Paratethys basin, isolated from the World Ocean, with oceanic crust and stagnant conditions, in which black non-carbonate and weak-carbonate clay sediments accumulated in the Oligocene-Miocene (Fig. 3).

As a result of the evolution of the lithosphere in the region, a unique South Caspian Basin (SCB) was formed, characterized by a thin consolidated crust (6–8 km) and a large thickness of the sedimentary cover (25–30 km) (Kerimov et al., 2014). The rate of subsidence in the Pliocene in the northern part of the SCB is 20–30 times higher than at the rift stage of opening, and 2 orders of magnitude higher than in the Cretaceous and Paleogene periods. The reason for the significantly higher Pliocene sedimentation rates and loads observed in the SCB is the very large volume of sediment introduced in a short period of time. The Pliocene–Quaternary time (5.3 million years) here is represented by stable subsidence, high rates and rates of sedimentation, as well as the activity of the Paleo-Volga, Paleo-Kura, Paleo-Uzboy, Paleo-Amu Darya (Guliev, Kerimov, & Mustaev, 2016), associated with the introduction of a huge volume of sediment fill (Fig. 6).

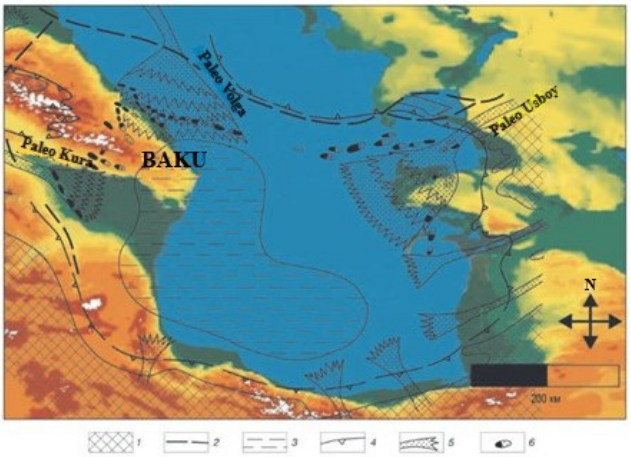



**Fig. 6. Paleogeographical scheme of the South Caspian depression in the Pliocene (Kerimov et al.,2014):**
1 – meganticlinoria and folded areas; 2 – main faults; 3 – pontic basin by the end of the century; 4 – boundary of the South Caspian basin towards the end of the Lower Pliocene; 5 – paleodeltas; 6 – oil and gas fields

At this time, the growth of mountain structures in the frame of the megadepression is accompanied by rapid subsidence of the crust within the Southern Caspian Sea, its shallowing and reduction in the area of the sedimentation basin. The thickness of the sediments accumulated during this period reaches about 9–10 km, of which the Lower Pliocene – Productive Strata (PS) – accounts for 6–7 km. With a duration of the PS century of 2–2.5 million years, the average rate of sedimentation here is about 3–3.5 km/million years, and at certain stages it becomes hurricane-like, with a speed of 6–7 km/million years. Isochron maps constructed for the PS indicate that in these intervals sedimentation occurred in a subsidence basin that did not experience active deformation during subsidence. The eastern (Turkmen) part of the basin subsided at a lower rate, and sediment accumulation was less powerful. The increased thickness of sediments in the western and northern parts of the basin indicates that the source of sedimentation was the predecessor of the Kura in the western part and the paleo-Volga in the north. Thus, in contrast to the peripheral areas of the sea basin, which experienced strong tectonic deformations and folding, the South Caspian depression, squeezed on all sides, remained relatively little deformed.

The Pliocene age for the beginning of the stage of rapid subsidence and deformation of the earth's crust of the Southern Caspian Sea corresponds to the time of the opening of the Red Sea, which led to a rapid and sharp movement to the north of the Arabian Platform, acceleration of plate convergence, extreme reduction of the SCS and mountain framing structures, and intensification of folding processes in its sedimentary cover.

Analysis of materials from ultra-deep seismometry in the South Sea (Alizadeh et al., 2017), as well as seismometry and gravimetry (Allen, & Weihed, 2002) showed that the subsidence of the South Caspian in the northern direction occurs according to the subduction model.

However, there is another point of view on the rapid subsidence of the consolidated crust of the SCS, based on the plumotectonic concept that is being developed (Ismail-Zade, 2006; Pogorelova, & Abdulla-zada, 2023; Rustamov, 2005). According to M. I. Rustamov, the main events in the plumotectonic processes of the SCB are mantle absorption and crustal resurgence, the emergence of waveguides along the zones of deep faults at the crust-mantle boundary and crustal level, and the failure of the bottom of the basin. Sedimentation in the Cenozoic in the South Caspian basin occurs in a regional collisional geodynamic setting, accompanied by successive thinning of the consolidated crust. The resurgent crust of the South Caspian basin, the author believes, corresponds only in geophysical parameters to a basalt layer, and it should not be accepted as a relic of the spreading oceanic crust of the geological past. The crust of the SCB was revived at the regional collisional geodynamic stage in the Cenozoic as a result of mantle diapirism, decompression and heating of the upper mantle, accompanied by intense high-temperature fluid flows, similar in modern intraplate rifts – Baikal, Krasnomorsky, etc. (Rustamov, 2005).

The area of the present research is the Yevlakh-Agjabedi region of subsidence and increased sedimentation (Fig. 7), which constitutes the Yevlakh-Agjabedi oil and gas region, located in the southeastern part of Western Azerbaijan, includes two oil and gas regions (the Mil oil and gas region, which includes the Muradkhanli oil and gas accumulation zone, and the Lesser Caucasus oil and gas region with the Naftalan oil accumulation zone included in it), as well as the Jalilabad promising oil and gas region.

This area of subsidence has the shape of an irregular oval, extends in the NW-SE direction, covering significant parts of the Mil and Shirvan steppes, as well as the foothill regions of Talysh. The most intense area of subsidence of the zone is located in the area between the Terterchay and Khachinchay rivers, where the thickness of the sedimentary cover is more than 14 km.

The indicated sedimentation area is a highly promising territory for oil and gas formation and oil and gas accumulation in Upper Cretaceous, Paleogene and Miocene deposits, since within its boundaries there were features of geological structure and development that determined favorable combinations of the main conditions for oil and gas formation and oil and gas accumulation. This depression area, throughout the entire Mesozoic-Cenozoic cycle of sedimentation, was a paleo-depression, characterized by significant dimensions (on the order of hundreds of kilometers along the perimeter) and stable subsidence (the subsidence of Paleogene deposits in the axial parts of this large depression was up to 8–9 km). The accumulation of

Paleogene-Miocene sediments occurred mainly in a subaqueous environment with an anaerobic geochemical situation; here, geological and geophysical work has revealed structural and non-anticlinal traps in the range from Upper Cretaceous formations to Miocene deposits, with which a number of oil and gas accumulations are associated here. Below we will consider the prospects for the oil and gas potential of each oil and gas region included in this area.




**Fig. 7. Scheme of tectonic and oil-gas-geological zoning of the Yevlakh-Agjabedi oil and gas region (OGR) and the Pre-Talysh-Mingechaur low-prospect region Middle Kura-Kartli oil and gas subprovince (NGSP) of the Transcaucasian oil and gas provinces (NGP)**

Borders: 1 – southwestern and southeastern borders of the Middle Kura-Kartli NGSP; 2 – borders of the Yevlakh-Agjabedi NGR and the Pre-Talysh-Mingachevir unpromising region; 3 – boundaries of tectonic (oil and gas-bearing) regions; 4 – boundaries of oil and gas accumulation zones. Hydrocarbon accumulation sites: 5 – oil; 6 – areas with industrial inflows of oil and gas; 7 – anticlinal folds of the Mesozoic-Paleogene; 8 – major tectonic faults (faults): Z-K – West Caspian; S–M – Saatly-Mingachevir; SH–G – Shamkhor-Geokchay; P–M – Pre-Lesser Caucasus; P–T – Pre-Talysh. 9 – state borders of Azerbaijan. MK – meganticlinorium of the Lesser Caucasus; TL – Talysh mountain system.

Tectonic and oil and gas geological zoning: JAO – south-eastern region of the deflection of the Middle Kura-Kartli depression (NGSP) – Yevlakh-Agjabedi oil and gas bearing region. M – Silsky tectonic (oil and gas bearing) region. I – Muradkhanly oil and gas accumulation zone. Accumulation locations: 3 – Zardob; 4 – Muradkhanly; 5 – Jafarli. Anticlinal uplifts: 1 – Amirarkh-Western; 2 – Amirarkh; 6 – Shirinkum; 7 – Milskaya. P – Pre-Lesser Caucasus tectonic (oil and gas bearing) region. II – Naftalan oil accumulation zone. Accumulation sites and areas with industrial oil inflows: 1 – Dalmamedli; 2 – Borsunly; 3 – Kazanbulag; 4 – Gedakboz; 5 – Naftalan; 6 – Ajidere; 7 – Terter; 8 – Shirvanly; 9 – Duzdag. Anticlinal uplifts: 10 – Airidja; 11 – Barda; 12 – Tazakend; 13 – Gullyudzha; 14 – Agjabedi; 15 – Aggel; 16 – Sovetlyar; 17 – Zhdanovsk. D – Jalilabad tectonic (prospective oil and gas bearing) region.

Anticlinal uplifts: 1 – Tumarkhanly; 2 – Germeli; 3 – Boykhanly. P–A – Priaras tectonic region with unclear oil and gas potential. P–M–O – Pre-Talysh-Mingachevir tectonic (unpromising in terms of oil and gas) region. Elevations: 1 – Karadzha; 2 – Karadzhally; 3 – Sor–Sor; 4 – Dzharly; 5 – Saatly; 6 – Khalafli; 7 – Middle Mugan; 8 – Shorsulu; 9 – Kyrmyzykend; 10 – Bilasuvar; 11 – Uzuntepe

As already noted, the Mil oil and gas region is located within the north-eastern edge of the Yevlakh-Agjabedi trough, in the zone of its junction with the Saatly-Mingachevir branch of the Pre-Talysh-Mingachevir zone of uplifts. A number of deposits have been identified here in Upper Cretaceous, Eocene, Maikop and Chokrak rocks, which are part of the Muradkhanli oil and gas accumulation zone. The oil and gas potential of this region is mainly based on the works (Averbukh, 1993; Averbukh, Shilov, & Nadirov, 1994; Gadirov, Gadirov, & Gamidova, 2016; Guliyev, 1997; Kerimov, & Averbukh, 1979; Kerimov, & Averbukh, 1982; Rachinsky, & Kerimov, 2015).

In 1971, within the NE edge of the Yevlakh-Agjabedi trough of the Srednekura depression, the Muradkhanli oil field was discovered, confined to a volcano-tectonic buried uplift of Cretaceous age, in which the oil-bearing rocks were found to be effusive-pyroclastic rocks of the Upper Cretaceous (Fig. 8).

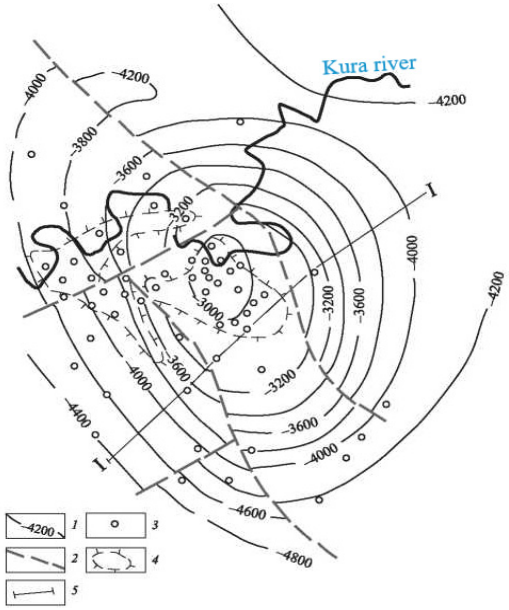



**Fig. 8. Muradkhanly area. Structural map of the surface of effusive-pyroclastic formations of the Upper Cretaceous**

Legend: 1 – isolines of the surface of effusive-pyroclastic formations of the Upper Cretaceous; 2 – faults; 3 – wells that exposed effusive-pyroclastic rocks of the Upper Cretaceous; 4 – boundaries of oil and gas accumulation zones in the weathering crusts of effusive formations of the Upper Cretaceous; 5 – line of the Shirinkum-Muradkhanly profile section (Alieva et al., 2017)

In subsequent years (1973–1976), oil deposits were also discovered in the complex of Paleogene-Miocene rocks overlying the effusive formations – in the Eocene, Maikop, and Chokrak deposits (Mykhailov, & Zagnitko, 2017; Yetirmishli, Mammadli, & Kazimova, 2013; Yusubov, Alizadeh, & Rajabli, 2019; Yusubov, & Guliev, 2022).

Similar deposits in effusive (volcanic) rocks are known only in the Shaim oil and gas accumulation zone of the Krasnolensk arch in Western Siberia, within the Oymashinsky accumulation in Western Turkmenistan, and also: 1) in east-central Texas (USA), where a group of oil accumulations is known along the Luling-Mexia fault zone (the largest of which is Lytton Springs), within which oil deposits are confined to fractured serpentinite metavolcanic rocks of Upper Cretaceous age; 2) the oil accumulation sites of the island of Cuba, where the oil deposits are associated with Cretaceous serpentinites, in Febro (Mexico), some

accumulation sites in Ecuador, and also Aujila in Libya, where the oil is found in igneous or crystalline rocks that have been subjected to erosion and weathering (Reilinger et al., 2006; Sosson et al., 2016; Tibaldi et al., 2018; 2019).

In all these localities, the fracture porosity of volcanogenic-pyroclastic rocks is caused by processes of internal adaptation inherent in the transition of lava and pyroclastic formations into modern metavolcanic rock, as well as by processes of weathering, denudation and erosion: their oil saturation is secondary and occurs, in all likelihood, due to migration from neighboring overlying or underlying regional oil-bearing sedimentary formations.

The above-mentioned deposits, according to the classification of stratigraphic, lithological and combined deposits (Guliev, Kerimov, & Osipov, 2011; Hudson et al., 2008) belong to the complex type of combined structural-lithological-stratigraphic deposits, to a group of deposits with sharply changing reservoir properties of volcanic or crystalline formations, unconformably covered by impermeable rocks.

In the Muradkhanly area, oil deposits in effusive-pyroclastic formations of the Upper Cretaceous are confined to complex traps formed in zones of weathered and altered effusive-pyroclastic rocks of the Upper Cretaceous as a result of processes of disintegration, leaching, hydrolysis, halmyrolysis and cataclasis and also in the deluvium (delapsia) of these rocks, with their unconformable overlap by younger clay formations of the Upper Eocene and Maikop. Such complex traps and the deposits associated with them, as already noted above, by their confinement to buried uplifts, lithological limitation of the reservoir by area and unconformable overlap by fluid seals, are classified as structural-lithological-stratigraphic (combined). The above-mentioned deposits are classified as the so-called "vein" type, which contradicts the actual data of lithological and petrographic studies of rocks of volcanic formations in the zones of their oil saturation (Mykhailov, 2018).

Within the central tectonic block, to which the arched part of the Muradkhanli volcano-tectonic uplift in the Upper Cretaceous is confined, the lowest elevation at which industrial inflows were obtained is minus 3315 m and the height of the discovered deposit in these formations within the central block is about 397 m. An approximate outline of the identified oil content is shown on the structural map along the surface of effusive-pyroclastic formations (see Fig. 8). The discovered deposit on the crest of the uplift in the central block has dimensions of 3.2×2 km.

Analyzing the depth of the exposed section of effusive-pyroclastic formations of chalk in productive wells, we can conclude that the oil saturation of effusive-pyroclastic rocks on the crest of the fold is associated with their upper, roof part. In the overwhelming majority of wells, oil inflows were obtained from a section interval of 5–50 m from the roof of effusive-pyroclastic formations. Only in well No.3 was oil inflow obtained from an interval located at depths of 75 to 100 m from the roof of the effusive-pyroclastic rocks. In well No.27, it was not possible to precisely identify the oil-bearing interval, since the oil inflow with a flow rate of 1 $m^3$/day was obtained from an interval located from 3 to 200 m from the roof of the effusive-pyroclastic rocks.

In the western block, tectonically lowered below the central block, represented by the central part of the relatively steeply dipping southwestern wing of the uplift, the identified deposit is located in the northeastern part of this block and has the form of a strip with dimensions of 2.7×1 km. The approximate height of the discovered deposit in the western block is 150 m. The initial flow rates of the productive wells of this block vary greatly. The highest initial oil flow rate (270 $m^3$/day) was obtained from well No.211, drilled in the southwestern part of the deposit. The oil saturation intervals of the productive wells are also quite different: from 0 to 128 m from the roof of the effusives.

In the northwestern block, which tectonic corresponds to the northwestern pericline of the western wing of the uplift, the identified deposit is located in the southeastern part of the block, adjoins a tectonic fault, has an irregular shape in plan and dimensions of about 5×2.7 km. The height of the deposit discovered within the northwestern block is approximately 1100 m. The initial flow rates of productive wells in the northwestern block, as well as in other previously considered blocks, are extremely ambiguous (from 2–4 to 300 $m^3$/day). In all wells of this block, the oil-saturated interval from the roof of the effusive-pyroclastic rocks does not extend to a depth of more than 100 m.

In the eastern block, tectonically corresponding to the gently sloping northeastern wing of the fold, in all four wells, when sampling both the effusive-pyroclastic formations and the Upper Cretaceous carbonate deposits lying above them, no oil or water inflows were obtained; the wells turned out to be dry (Fig. 8).

Oil reservoirs, within the limits of the identified oil deposits in the Upper Cretaceous effusive formations within the Muradkhanli uplift, are fractured and cavernous effusive-pyroclastic rocks of the porphyrite type and their tuffs, as well as their brecciated varieties.

The distribution of oil in effusive-pyroclastic formations is associated with pores, caverns, cracks and intergranular space. In addition, oil is found in the form of accumulations, spots of various shapes, veins and point (effusive) occurrence in the rock. The filling of voids with oil is to some extent related to the structure of the host rocks, with the greatest accumulation usually confined to areas with a more granular structure.

Zonal distribution of oil-bearing capacity within the effusive-pyroclastic formations of the Upper Cretaceous Muradkhanli volcano-tectonic uplift, the highly variable reservoir properties of these formations, as well as the limited depth from the surface and changing area of the effective thickness of these rocks are largely associated with the features of the history of the formation of these formations.

Within the NE edge of the Yevlakh-Agjabedi trough, where the Muradkhanli area is located, from the beginning of the Upper Cretaceous the deep Mingachevir-Lenkoran fault began to develop intensively, along which an intensive subsidence of the NE edge of the Yevlakh-Agjabedi trough occurred with simultaneous intensive manifestation of volcanism. As a result, a more than 2000-m thick layer of effusive-pyroclastic formations was formed here.

Volcanism in this region developed according to the island arc type, with the accumulation of erupted material in the first stage in an underwater environment, and by the end of the volcanic cycle (the beginning of the Senonian). It is possible that above-water eruptions also took place here – on large volcanic islands located in the Muradkhanly and Zardob region, which were simultaneously also subject to denudation processes.

In the Senonian, the territory of the NE edge of the Yevlakh-Agjabedi trough was a sedimentation basin of carbonate and terrigenous-carbonate deposits. However, the arched parts of the volcano-tectonic uplifts in the Muradkhanly and Zardob areas either remained unaffected by the Senonian transgression or were covered by thin sediments, washed away during the subsequent regression that began at the beginning of the Paleogene (Fig. 9).

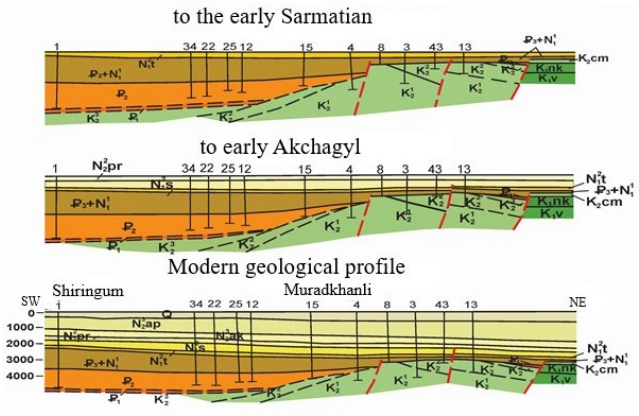



**Fig. 9. Paleostructural profile sections along the Shirinkum-Muradkhanly line**

During this long regression, which lasted for about 20–25 million years, right up to the top of the Eocene, and on the crest of the uplifts – even up to the top of the Maikop, the effusive-pyroclastic formations of the Upper Cretaceous were subjected to intensive processes of weathering, erosion and denudation.

These processes proceeded especially intensively near the fault zones that developed in the effusive-pyroclastic formations of the Upper Cretaceous as a result of orogenic movements at the beginning of the Maikopian, as well as in the domed and near-domed parts of the uplifts that were subject to weathering processes for the longest time.

Another promising direction within the oil and gas region under consideration is the search for oil and gas deposits in the carbonate deposits of the upper part of the Upper Cretaceous (Upper Santonian-Danian rocks). These deposits are distributed within the more submerged wing zones of the above-mentioned uplifts, where there may be stratigraphic hydrocarbon deposits in fractured reservoirs associated with these deposits.

Within the Paleogene deposits of the Mil oil and gas region, the greatest oil and gas potential is associated with the Eocene deposits.

Within the oil and gas region under consideration, the following are identified as the main promising oil and gas-bearing horizons of the Eocene, in which commercial oil content has already been identified in a number of areas of the Muradkhanli oil and gas accumulation zone: carbonate (terrigenous-carbonate) unit, covering the entire volume of the middle Eocene (fracture reservoir), and sandy-siltstone unit (fracture-pore reservoir, a pack of frequently alternating layers of sandstones, siltstones, and sometimes marls with layers of clays), stratigraphically corresponding to the lower parts of the Upper Eocene deposits (analogs of the III Kazanbulag horizon or the supramarl pack – the lower parts of the middle foraminiferal layers) (Averbukh,1993).

The Eocene deposits under consideration within the north-eastern (Saatly-Mingachevir) subzone of the Yevlakh-Agjabedi trough (Mil oil and gas region) (Fig. 7) have now been exposed and studied by drilling in a number of areas (Muradkhanly, Mil, Zardob, Shirinkum, Amirarkh). Large oil deposits of the lithological-stratigraphic type have been identified in these deposits – in the Muradkhanly area – in the terrigenous-carbonate (marl) pack of the middle Eocene and in the sandy-silty supramarl pack of the lower Upper Eocene. The identified deposits are confined to horizons (terrigenous-carbonate deposits of the Middle Eocene and sandy-tuff-silt rocks of the supramarl pack of the lower Upper Eocene (Aslanov, Khuduzade, & Aslanzade, 2020; Ganbarov, & Ibrahimli, 2012) stratigraphically and lithologically wedging out upward along the rise of the layers, caused the formation of lithological-stratigraphic traps. The reservoir type of the deposits is massive-layered.

Thus, as can be seen from the above, within the north-eastern edge of the Yevlakh-Agjabedi trough, the oil content of Eocene formations in various traps, but mainly non-anticline ones, has a regional character – along the entire strip of regional wedging out of these deposits (Ganbarov, & Ibrahimli, 2012).

The indicated fractured and pore reservoir units are the main promising oil and gas-bearing horizons of the Eocene within the entire subzone under consideration.

The assessment of the oil and gas potential of this subzone is based on the following featurs of its geological structure and development: the specified subzone of oil accumulation in geological terms is a strip of junction of the NE edge of the Yevlakh-Agjabedi trough of the Middle Kura-Kartli depression and the south-western slopes of the Geokchai-Mingachevir, Kurdamir-Saatly and Bilasuvar-Karadonly buried ledges of the second order, which are part of the large Talysh-Vandam transverse uplift, dividing the Middle Kura and Lower Kura depressions. All these projections during most of the Mesozoic-Cenozoic time experienced a tendency to uplift and acted as areas of uplift and erosion, exerting a significant influence on the distribution of facies and thicknesses within the Yevlakh-Agjabedi trough of the Middle Kura depression.

The Yevlakh-Agjabedi trough, in contrast to the described protrusions, experienced a tendency towards stable subsidence and was an area of intensive sedimentation. The boundary zone between these structural elements alternately experienced subsidence and uplift during the Mesozoic-Cenozoic history. The alternating tectonic stresses that existed for a long time in this zone led to the formation of a network of long-developing deep faults and to the periodic manifestation of volcanic activity (mainly in the Mesozoic period). In the Paleogene, these features of geological development led, on the one hand, to the accumulation of terrigenous-carbonate reservoirs and thick clayey covers, and on the other hand, to the formation of extensive zones of regional unconformities and wedging out, which together led to the formation of lithological-stratigraphic traps in this oil and gas accumulation zone (Ganbarov, & Ibrahimli, 2012).

The probable zone of oil and gas formation, which served as a source of hydrocarbon fluids for the regional oil accumulation zone under consideration, was the central part of the Yevlakh-Agjabedi trough, where, during most of the Mesozoic-Cenozoic history, there was a steady subsidence and accumulation of a thick layer of Eocene deposits, from where oil migrated into lithological-stratigraphic traps, confined to the zone of unconformable adjacency of Eocene terrigenous-carbonate reservoirs to the eroded surface of Upper Cretaceous effusive formations.

The formation of lithological oil deposits in zones of increased fracturing of the regolith surface of the Upper Cretaceous effusive rocks – in the crest of the uplift – occurred as a result of lateral migration and partial flow of oil from the Eocene reservoirs of the south-west wing and south-east pericline – along weathering zones and cracks.

The identified industrial oil content of the middle and upper Eocene deposits in one of the areas of this regional oil accumulation zone (Muradkhanly), similar geological structure of the Shirinkum, Milskaya, Zardobskaya and Amirarkhskaya areas and oil and gas shows recorded during the drilling and testing of a number of wells, leave no doubt

that both to the northwest and to the southeast of the Muradkhanli area, oil and gas reserves of the lithological-stratigraphic type can be identified in the indicated strip of regional wedging and stratigraphic unconformity, confined to the terrigenous-carbonate pack of the middle Eocene (fracture-pore collector) and to the sandy-silty layers of the lower parts of the upper Eocene (pore collectors).

**References**


Adamia, Sh. A., Zakariadze, G. S., & Lordkipanidze, M. B. (1974). Evolution of an ancient active continental margin: the example of the Caucasus. *Geotectonics*, 4, 88–103 [in Russian]. [Адамия, Ш. А., Закариадзе, Г. С., & Лордкипанидзе, М. Б. (1974). Эволюция древней активной континентальной окраины: на примере Кавказа. *Геотектоника*, 4, 88–103].

Afandiyeva, M. A., & Guliev, I. S. (2013, June). Maikop Group-shale hydrocarbon complex in Azerbaijan. In *75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013* (p. 348). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20130979

Aliev, A. A. (2006). Mud volcanism of the South Caspian oil and gas basin. *Geology and mineral resources of the World Ocean*, 3, 35 [in Russian]. [Алиев, А. А. (2006). Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна. *Геология и минеральные ресурсы Мирового океана*, 3, 35].

Alieva, S. A., Averbukh, B. M., Serikova, U. S., & Mustaev, R. N. (2017). *Geology and oil and gas potential of the Caspian basin*. "Scientific Publishing Center" INFRA-M [in Russian]. [Алиева, С. А., Авербух, Б. М., Серикова, У. С., & Мустаев, Р. Н. (2017). *Геология и нефтегазоносность Прикаспийской впадины*. "Научно-издательский центр" INFRA-M].

Alizadeh, A. A., Guliyev, I. S., Kadirov, F. A., & Eppelbaum, L. V. (2017). Deep structure of Azerbaijan derived from combined geophysical–geological analysis. In *Geosciences of Azerbaijan: Economic Geology and Applied Geophysics* (Vol. 2, pp. 171–218). https://doi.org/10.1007/978-3-319-40493-6_5

Allen, R. L., & Weihed, P. (2002). Global comparisons of volcanic-associated massive sulphide districts. *Geological Society, London, Special Publications*, 204(1), 13–37.

Aslanov, B. S., Khuduzade, A. I., & Aslanzade, F. B. (2020). New data on deep folding of Mesozoic sediments (on the example of the Yevlakh-Agjabedi trough, Azerbaijan). *Oil and Gas Geology*, 3, 19–28 [in Russian]. [Асланов, Б. С., Худузаде, А. И. и Асланзаде, Ф. Б. (2020). Новые данные о глубинной складчатости мезозойских отложений (на примере Евлах-Агджабединского прогиба, Азербайджан). *Геология нефти и газа*, 3, 19–28]. https://doi.org/10.31087/0016-7894-2020-3-19-28

Averbukh, B. M. (1993). Prospects for oil exploration in Eocene lithological-stratigraphic traps at the south-eastern subsidence of the Milsky structural ledge. *Azerbaijan Oil Economy*, 6 [in Russian]. [Авербух Б.М. (1993). Перспективы поисков залежей нефти в литолого-стратиграфических ловушках эоцена на ЮВ погружении Мильского структурного выступа. *Азербайджанское Нефтяное Хозяйство*, 6].

Averbukh, B. M., Shilov, G. Ya., & Nadirov, R. S. (1994). Methodology for searching for hydrocarbon deposits in buried weathering crusts of volcanic rocks. *Geology of Oil and Gas*, 7 [in Russian]. [Авербух, Б. М., Шилов, Г. Я., & Надиров, Р. С. (1994). Методика поисков месторождений углеводородов в погребенных корах выветривания вулканических пород. *Геология нефти и газа*, 7].

Babayev, D. Kh., & Hajiyev, A. N. (2006). *Deep structure and oil and gas potential of the Caspian Sea basin*. Nafta-Press [in Russian]. [Бабаев, Д. Х., & Гаджиев, А. Н. (2006). *Глубинное строение и нефтегазоносность Прикаспийской впадины*. Nafta-Press].

Bazhenov, M. L., & Shipunov, S. V. (1991). Fold test in paleomagnetism: New approaches and reappraisal of data. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(1), 16–24 [in Russian]. [Баженов, М. Л., и Шипунов, С. В. (1991). Тест складчатости в палеомагнетизме: новые подходы и переоценка данных. *Earth and Planetary Science Letters*, 104(1), 16–24]. https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90233-8

Gadirov, V. G., Gadirov, K. V., & Gamidova, A. R. (2016). The deep structure of Yevlakh-Agjabedi depression of Azerbaijan on the gravity-magnetometer investigations. *Geodynamics*, 20, 133–143 [in Russian]. [Гадиров, В. Г., Гадиров, К. В., Гамидова, А. Р. (2016). Глубинное строение Евлахско-Агджабединской впадины Азербайджана по данным гравимагнитометрических исследований. *Геодинамика*, 20, 133–143].

Gamkrelidze, I. P. (1988). Alpine geodynamics of the Caucasus and the adjacent areas. *Studia Geologica Polonica*, 61–75.

Ganbarov, Yu. G., & Ibrahimli, M. S. (2012). Non-anticlinal traps identified in the Yevlakh-Agjabedi trough of Azerbaijan and their prospects. *Geophysics*, 3, 30–34 [in Russian]. [Ганбаров, Ю. Г., & Ибрагимли, М. С. (2012). Неантиклинальные ловушки, выявленные в Евлахско-Агджабединском прогибе Азербайджана, и их перспективы. *Геофизика*, 3, 30–34].

Guliev, I. S., & Kerimov, V. Yu. (2012). Ultradeep hydrocarbon systems and technologies for their forecasting. *Theoretical Foundations and Technologies for Oil and Gas Exploration and Prospecting*, 1, 24–32 [in Russian]. [Гулиев, И. С., & Керимов, В. Ю. (2012). Сверхглубокие углеводородные системы и технологии их прогноза. *Теоретические основы и технологии поисков и разведки нефти и газа*, 1, 24–32].

Guliev, I. S., Kerimov, V. Yu., & Mustaev, R. N. (2016). Fundamental problems of oil and gas potential of the South Caspian basin. *Reports of the Academy of Sciences*, 471(1), 62–65 [in Russian]. [Гулиев, И. С., Керимов, В. Ю., & Мустаев, Р. Н. (2016). Фундаментальные проблемы нефтегазоносности Южно-Каспийского бассейна. *Доклады Академии наук*, 471(1), 62–65]. https://doi.org/10.7868/S0869565216310315

Guliev, I. S., Kerimov, V. Yu., & Osipov, A. V. (2011). Hydrocarbon potential of great depths. *Oil, Gas and Business*, 5, 9 [in Russian]. [Гулиев, И. С., Керимов, В. Ю., & Осипов, А. В. (2011). Углеводородный потенциал больших глубин. *Нефть, газ и бизнес*, 5, 9].

Guliyev, I. S. (1997). Excited geological structures and their role in the processes of dynamics and near oil and gas fields. *Neotectonics and its influence on the containment of oil and gas fields*. Nafta-Press, Baku [in Russian]. [Гулиев, И. С. (1997). Возбужденные геологические структуры и их роль в процессе динамики и формировании месторождений нефти и газа. *Неотектоника и ее влияние на формирование месторождений нефти и газа*. Nafta-Press, Баку].

Guliyev, I. S., Kerimov, V. Yu., Osipov, A. V., & Mustaev, R. N. (2017). Generation and accumulation of hydrocarbons in conditions of great depths of the earth's crust. *Scientific works of NIPI Neftegaz SOCAR*, 1, 4–16. https://doi.org/10.5510/OGP20170100302

Guliyev, I. S., Levin, L. E., & Fedorov, D. L. (2003). *Hydrocarbon potential of the Caspian region (system analysis)*. Nafta-Press [in Russian]. [Гулиев, И. С., Левин, Л. Е., & Федоров, Д. Л. (2003). *Углеводородный потенциал Каспийского региона (системный анализ)*. Нафта-Пресс].

Hudson, S. M., Johnson, C. L., Rowe, H. D., Efendiyeva, M. A., Feyzullayev, A. A., & Aliyev, C. S. (2008). Stratigraphy and geochemical characterization of the Oligocene-Miocene Maikop Series: Implications for the paleography of Eastern Azerbaijan. *Tectonophysics*, 451(1–4), 40–55. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.045

Ismail-Zade, A. D. (2006). Petrological interpretation of the hybridism process in Mesozoic granitoid intrusions of the Lesser Caucasus. *Izvestiya AN Azerbaijan, Geosciences*, 2, 9–19 [in Russian]. [Исмаил-Заде, А. Д. (2006). Петрологическая интерпретация процесса гибридизма в мезозойских гранитоидных интрузиях Малого Кавказа. *Известия АН Азербайджана, Науки о Земле*, 2, 9–19].

Ivanov, A., Golubov, B., & Zatyagalova, V. (2007). Forecast of oil and gas content and search for oil fields in the sea using space radar data. *Technologies of the Fuel and Energy Complex*, 4, 40–48. [in Russian]. [Иванов, А., Голубов, Б., & Затягалова, В. (2007). Прогноз нефтегазоносности и поиск нефтяных месторождений в море по данным космической радиолокации. *Технологии топливно-энергетического комплекса*, 4, 40–48].

Kerimov, V. Yu., Averbukh, B. M. (1979). Prospects for the Search for Non-Structural Oil and Gas Deposits in Western Azerbaijan. *News of Higher Education Institutions, "Oil and Gas"*, 2 [in Russian]. [Керимов В. Ю., Авербух Б. М.( 1979). Перспективы поисков неструктурных залежей нефти и газа в Западном Азербайджане. *Известия ВУЗов, "Нефть и газ"*, 2].

Kerimov, V. Yu., Averbukh, B. M. (1982). *Stratigraphic and lithological deposits of oil and gas of Azerbaijan*. Elm [in Russian]. [Керимов В. Ю., Авербух Б. М. (1982). *Стратиграфические и литологические залежи нефти и газа Азербайджана*. Элм].

Kerimov, V. Yu., Khalilov, E. A., & Mekhtiev, N. Yu. (1992). Paleogeographic conditions of the formation of the South Caspian Basin in the Pliocene epoch in connection with its oil and gas potential. *Geology of Oil and Gas*, 10, 5–8 [in Russian]. [Керимов, В. Ю., Халилов, Э. А., & Мехтиев, Н. Ю. (1992). Палеогеографические условия формирования Южно-Каспийской впадины в плиоценовую эпоху в связи с ее нефтегазоносностью. *Геология нефти и газа*, 10, 5–8].

Kerimov, V. Y., Rachinsky, M. Z., Mustaev, R. N., & Osipov, A. V. (2017). Groundwater dynamics forecasting criteria of oil and gas occurrences in alpine mobile belt basins. *Doklady Earth Sciences*, 476(1), 1066–1068. https://doi.org/10.1134/S1028334X17090136

Kerimov, V. Yu., Serikova, U. S., Mustaev, R. N., & Guliev, I. S. (2014). Oil and gas potential of deep-lying sediments of the South Caspian Basin. *Oil Industry*, *5*, 50–54 [in Russian]. [Керимов, В. Ю., Серикова, У. С., Мустаев, Р. Н., & Гулиев, И. С. (2014). Нефтегазоносность глубокозалегающих отложений Южно-Каспийской впадины. *Нефтяное хозяйство*, 5, 50–54].

Khain, V. E., & Bogdanov, N. A. (2003, April). The Caspian megabasin: Tectonics and evolution. In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*.

Khain, V. E., & Sokolov, B. A. (1984). Continental margins—the Earth's main oil and gas bearing zones. *Sov. Geology*, 7, 49–60 [in Russian]. [Хаин, В. Е., & Соколов, Б. А. (1984). Окраины континентов – главные нефтегазоносные зоны Земли. *Сов. геология*, 7, 49–60].

Knipper, A. L., Satian, M. A., & Bragin, N. Y. (1997). Upper Triassic-Lower Jurassic volcanogenic and sedimentary deposits of the Old Zod Pass (Transcaucasia). *Stratigraphy, geological correlation*, 3, 58–65.

Kucheruk, E. V., & Alieva, E. R. (1983). Current status of classification of sedimentary oil and gas basins. *Review information. Oil and Gas Geology and Geophysics*. VNIIOENG [in Russian]. [Кучерук, Е. В., & Алиева, Е. Р. (1983). Современное состояние классификации осадочных нефтегазоносных бассейнов. *Обзорная информация. Нефтегазовая геология и геофизика*. ВНИИОЭНГ].

Mamedov, P. Z. (2006). Features of the Earth's crust of the South Caspian Basin in light of new geophysical data. *Izvestiya NAS Azerb. Geosciences*, 3, 36-48 [in Russian]. [Мамедов, П. З. (2006). Особенности земной коры Южно-Каспийской впадины в свете новых геофизических данных. *Изв. НАН Азерб. Науки о земле*, 3, 36–48].

Mamedov, P. Z. (2010). Modern architecture of the South Caspian megabasin is the result of multistage evolution of the lithosphere in the central segment of the Alpine-Himalayan mobile belt. *News of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Earth Sciences*, 4, 46–72 [in Russian]. [Мамедов, П. З. (2010). Современная архитектура Южно-Каспийского мегабассейна – результат многоэтапной эволюции литосферы в центральном сегменте Альпийско-Гималайского подвижного пояса. *Известия НАН Азербайджана, науки о Земле*, 4, 46–72].

Muslimov, R. H., Glumov, I. F., Plotnikova, I. N., Trofimov, V. A., & Nurgaliev, D. K. (2004). Oil and gas fields-self-developing and constantly renewable objects. *Geology of Oil and Gas*, 1, 43–49 [in Russian]. [Муслимов, Р. Х., Глумов, И. Ф., Плотникова, И. Н., Трофимов, В. А., & Нургалиев, Д. К. (2004). Нефтяные и газовые месторождения – саморазвивающиеся и постоянно возобновляемые объекты. *Геология нефти и газа*, 1, 43–49].

Mykhailov, V. (2017). Comparative characteristics of Maikop series of Caspian-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(77), 59–71 [in Russian]. [Михайлов, В. (2017). Сопоставительная характеристика Майкопской серии Каспийско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(77), 59–71]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.77.07

Mykhailov, V. (2018). Hydrocarbon potential of the Maikop Series. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(80), 53–62 [in Russian]. [Михайлов, В. (2018). Нефтегазогенерационный потенциал Майкопской серии. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(80), 53–62]. https://doi.org/10.17721/17282713.80.07

Mykhailov, V., & Zagnitko, V. (2017). Geochemical features of Maikop series of Crimean and Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(78), 60–70 [in Russian]. [Михайлов, В., & Загнитко, В. (2017). Геохимические особенности Майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(78), 60–70]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.78.08

Nevesskaya, L. A., Goncharova, I. A., Il'ina, L. B., Paramonova, N. P., Popov, S. V., Bogdanovich, A. K., ... & Nosovskiy, M. F. (1984). A Regional Stratigraphic Scale for the Neogene Sequence of Eastern Paratethys. *International Geology Review*, 26(12), 1388–1401. https://doi.org/10.1080/00206818409466659

Pogorelova, E., & Abdulla-zada, M. (2023). Anti-Caucasian folding of the Kura-South Caspian Hollow (by the example of South Caspian Basin and Cis-Lesser Caucasian trough). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(100), 23–29. https://doi.org/10.17721/1728-2713.100.03

Rachinsky, M. Z., & Kerimov, V. Y. (2015). *Fluid dynamics of oil and gas reservoirs*. John Wiley & Sons.

Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... & Karam, G. (2006). GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5). https://doi.org/10.1029/2005JB004051

Rustamov, M. I. (2005). *South Caspian Basin – Geodynamic Events and Processes*. Nafta-Press [in Russian]. [Рустамов, М. И. (2005). *Южнокаспийский бассейн – геодинамические события и процессы*. Nafta-Press].

Shikhlinskii, A. Sh., Kheirov, M., & Mustafayev, Sh. A. (1990). On a new type of reservoir in the Upper Cretaceous deposits of the Tarsdallyar area. *Geology of Oil and Gas*, *(9)*. [in Russian]. [Шихлинский, А. Ш., Хейров, М., & Мустафаев, Ш. А. (1990). О новом типе коллектора в верхнемеловых отложениях площади Тарсдалляр. *Геология нефти и газа*, 9].

Shykhlinskiy, A. Sh., Kocharli, Sh. S., & Gadzhiev, F. M. (1990). Main results and directions of geological exploration and geophysical works on non-anticlinal traps in Azerbaijan. *Azerbaijan oil industry*, 2 [in Russian]. [Шихлинский, А. Ш., Кочарли, Ш. С., & Гаджиев, Ф. М. (1990). Основные результаты и направления геологоразведочных и геофизических работ на неантиклинальных ловушках Азербайджана. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, *2*].

Sokolov, S. Yu. (2019). Deep geodynamic state and its comparison with surface geological and geophysical parameters along the sublatitudinal section of Eurasia. *Geodynamics and Tectonophysics*, 10(4), 945–957 [in Russian]. [Соколов, С. Ю. (2019). Глубинное геодинамическое состояние и его сопоставление с поверхностными геолого-геофизическими параметрами вдоль субширотного разреза Евразии. *Геодинамика и тектонофизика*, 10(4), 945–957]. https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-4-0451

Sosson, M., Stephenson, R., Sheremet, Y., Rolland, Y., Adamia, S., Melkonian, R., & Mosar, J. (2016). The eastern Black Sea-Caucasus region during the Cretaceous: New evidence to constrain its tectonic evolution. *Comptes Rendus Geoscience*, 348(1), 23–32. https://doi.org/10.1016/j.crte.2015.11.002

Tibaldi, A., Bonali, F. L., Russo, E., & Mariotto, F. P. (2018). Structural development and stress evolution of an arcuate fold-and-thrust system, southwestern Greater Caucasus, Republic of Georgia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 156, 226–245. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.01.025

Tibaldi, A., Oppizzi, P., Gierke, J., Oommen, T., Tsereteli, N., & Gogoladze, Z. (2019). Landslides near Enguri dam (Caucasus, Georgia) and possible seismotectonic effects. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(1), 71–91.

Volozh, Yu. A., Antipov, P. P., & Lavrushin, Yu. A. (2004). *Map of Quaternary (Neopleistocene) deposits and elements of paleogeography of the Caspian region*. GIN RAS [in Russian]. [Волож, Ю. А., Антипов, П. П., & Лаврушин, Ю. А. (2004). *Карта четвертичных (неоплейстоценовых) отложений и элементов палеогеографии Каспийского региона*. ГИН РАН].

Yetirmishli, G. J., Mammadli, T. Y., & Kazimova, S. E. (2013). Features of seismicity of Azerbaijan part of the Greater Caucasus. *Journal of Georgian Geophysical Society, Physics of Solid Earth*, 16, 55–60.

Yusubov, N. P., Alizadeh, G. M., & Rajabli, B. D. (2019). Mud volcanism and hydrocarbon migration. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 8, 14–19 [in Russian]. [Юсубов, Н. П., Ализаде, Г. М., & Раджабли, Б. Д. (2019). Грязевой вулканизм и миграция углеводородов. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, 8, 14–19]. https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-8(332)-14-19

Yusubov, N. P. (2012). Features of seismicity and gas fields in Azerbaijan. *Geophysics*, *2*, 48–53.

Yusubov, N. P., & Guliev, I. S. (2022). *Mud volcanism and hydrocarbon systems of the South Caspian basin (according to the latest data from geophysical and geochemical studies)*. Elm. [in Russian]. [Юсубов, Н. П., & Гулиев, И. С. (2022). *Грязевой вулканизм и углеводородные системы Южно-Каспийского бассейна (по новейшим данным геофизических и геохимических исследований)*. Elm].

Zonenshain, L. P. (1990). *Geology of the USSR: a plate-tectonic synthesis*. American Geophysical Union.

Zonenshain, L. P., & Pichon, X. (1986). Deep basins of the Black Sea and Caspian Sea as remnants of Mesozoic back-arc basins. *Tectonophysics*, 123(1–4), 181–211.

Zonenshein, L., Kuzmin, M., & Kononov, M. (1987). Absolute reconstructions of the position of the Palaeozoic and Early Mesozoic palaeocontinents. *Geotektonica*, 3, 16–27.

**Отримано редакцією журналу / Received: 02.07.25**
**Прорецензовано / Revised: 05.09.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Судабе АЛІЄВА, канд. геол.-мінерал. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0001-7059-0868**
**e-mail: sudali58@gmail.com**
**Азербайджанський державний університет нафти і промисловості, Баку, Азербайджан**

## ГЕОДИНАМІЧНИЙ ТА ПАЛЕОТЕКТОНІЧНИЙ АНАЛІЗ ПІВДЕННОКАСПІЙСЬКОЇ МЕГАДЕПРЕСІЇ У ЗВ'ЯЗКУ З ПЕРСПЕКТИВАМИ НАФТИ І ГАЗУ (НА ПРИКЛАДІ ЄВЛАХ-АГДЖАБЕДИНСЬКОЇ ЗАПАДИНИ)

***В с т у п .*** ***При оцінці перспектив нафтогазового потенціалу найважливішим завданням є визначення генетичної належності осадового басейну, тобто типу геодинамічного режиму. У зв'язку із цим актуальною є стаття, присвячена геодинамічній еволюції Каспійського басейну. У роботі проаналізовано дані опублікованих робіт щодо геодинамічної еволюції вищезгаданої території. З погляду глобальної тектоніки плит, високий нафтогазоносний потенціал пов'язаний передусім із континентальними окраїнами, палеорифтовими улоговинами, зонами міжгірських та передових прогинів, що утворилися на завершальному етапі зіткнення плит, а також з насувними краями складчастих гірських структур. Визначальним фактором у нафтогазоутворенні є насамперед геодинамічний режим надр. При визначенні генотипу осадового басейну надзвичайно важливим параметром є тип континентальної земної кори, який пов'язаний не лише з амплітудою тектонічного просідання і, як наслідок, швидкістю осадконакопичення, потужністю осадового чохла, але й з величиною теплового потоку, що визначає умови утворення нафти і газу.***

***Р е з у л ь т а т и .*** ***В результаті аналізу основних критеріїв нафтогазового потенціалу найбільші перспективи ми пов'язуємо з північно-східною частиною області Євлах-Агджабединської западини та її північно-східною ділянкою південно-східного центрикінального замикання, де відбувається зчленування зазначеної западини зі схилами мезозойських виступів Геокчай-Мінгечаур, Саатли-Кюрдамір та Білясувар-Карадонли. Ймовірною зоною нафтогазоутворення, яка слугувала джерелом вуглеводневих флюїдів для розглянутої регіональної зони нафтонакопичення, була центральна частина Євлах-Агджабединської западини, де протягом більшої частини мезозойсько-кайнозойської історії відбувалося стійке просідання та накопичення потужного шару еоценових відкладень, звідки нафта мігрувала в літолого-стратиграфічні пастки, приурочені до зони незгодного примикання еоценових теригенно-карбонатних колекторів до розмитої поверхні верхньокрейдових ефузивних утворень.***

**В и с н о в к и .** ***Формування літологічних родовищ нафти в зонах підвищеної тріщинуватості поверхні реголіту верхньокрейдових ефузивних порід – у гребені підняття – відбулося в результаті латеральної міграції та часткового перетікання нафти з еоценових колекторів південно-західного крила та південно-східної перикліналі – вздовж зон вивітрювання та тріщин.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***Південнокаспійська плита, літосферна плита, геодинамічний режим, Східноєвропейська плита, осадовий басейн, вуглеводневий потенціал, Євлах-Агджабединський регіон, зона нафтогазонакопичення Мурадханлі, неструктурні пастки, колектори, ущільнення.***

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

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

UDC 553.98(262.81)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.09

Huseynaga MAMMADOV, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-6199-3892
e-mail: huseynaqa.mammadov@asoiu.edu.az
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Murad ABDULLA-ZADA, PhD (Earth sciences)
ORCID ID: 0009-0001-4150-8340
e-mail: murad.abdullazade@asoiu.edu.az
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Elena POGORELOVA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-2412-4441
e-mail: yelena.pogorelova@asoiu.edu.az
Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

# CASPIAN PIONEER: STRUCTURAL COMPLEXITY AND HYDROCARBON DISTRIBUTION IN THE NEFT DASHLARY OFFSHORE FIELD

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. Володимиром МИХАЙЛОВИМ)*

**Background.** *The Neft Dashlary (Oil Rocks) oil field is a geologically and historically unique offshore petroleum province, located in the southeastern sector of the Caspian Sea. As the first offshore field in the world to be developed directly on marine platforms, it has played a pioneering role in offshore hydrocarbon exploration and production. Geologically, the field occupies a structurally complex zone within the Absheron–Balakhany tectonic uplift and is situated atop a prominent northwest–southeast-trending brachyanticlinal fold. The reservoir system is primarily hosted within the Lower Pliocene Productive Series, which includes a multilayered assemblage of deltaic, coastal, and shallow-marine facies. Despite decades of production, the field remains a valuable subject for re-evaluation due to its reservoir heterogeneity, fault segmentation, and layered hydrocarbon distribution, which pose both challenges and opportunities for enhanced oil recovery and long-term development planning.*

**Methods.** *This study is based on a comprehensive analysis of geological, geophysical, petrophysical, and production data from more than 150 wells across the Neft Dashlary field. Core analyses (1,453 samples from 357 wells), well log interpretations, and test data were integrated to characterize reservoir properties and map hydrocarbon-saturated intervals. Reservoir architecture was reconstructed using stratigraphic correlations and structural contouring across tectonic blocks. Oil-in-place and recoverable volumes were estimated using deterministic volumetric methods. Faults and facies pinch-outs were analyzed to define reservoir continuity and trapping mechanisms.*

**Results.** *The Productive Series at Neft Dashlary comprises a multilayered reservoir system with oil-saturated intervals in 26 distinct stratigraphic objects across eight lithostratigraphic suites, including the Gala, Pre-Kirmaki, Kirmaki, and Post-Kirmaki sandy and clayey units. Reservoirs exhibit porosities of 12–28 % and permeabilities from 0.001 to 3.92 μm², with facies and structural heterogeneity governing hydrocarbon distribution. The most prolific zones are found in the GS-1 and GS-2 horizons (Gala Suite), and in PKS-2a and PKS-2 (Pre-Kirmaki Suite), particularly within Blocks II, III, IV, and V. Block I consistently exhibits low reservoir quality and marginal saturation. Structural closures, lithological seals, and facies transitions control the extent of hydrocarbon accumulations, while free gas is rarely encountered.*

**Conclusions.** *The Neft Dashlary field demonstrates complex stratigraphic and structural controls on reservoir distribution and productivity. Integrated geological and petrophysical analysis reveals significant heterogeneity both laterally and vertically, requiring block-by-block reservoir management strategies. The identification of key productive intervals and their spatial delineation provides a basis for optimized recovery planning and extended field life.*

**Keywords:** *Oil field, Productive Series, porosity, permeability, stratigraphy, tectonics, offshore zone, geophysical analysis.*

## Background

The Neft Dashlary (Oil Rocks) oil field stands as a historically significant and geologically complex offshore hydrocarbon accumulation located in the south-western sector of the Caspian Sea, approximately 110 kilometers southeast of Baku. Discovered in 1949, Neft Dashlary became the world's first offshore oil production site constructed directly on open sea infrastructure, marking a milestone in petroleum engineering and offshore field development. Spanning an area of approximately 66 km², the field is situated within the Absheron Archipelago system, which includes submerged structural highs and islands such as Chilov, Khali, and Kichik Tava. These features lie along the eastern margin of the Absheron Peninsula and form part of the broader Absheron–Balakhany tectonic uplift zone.

Geologically, Neft Dashlary is located on a northwest–southeast-trending brachyanticlinal fold, bounded and segmented by an array of longitudinal and transverse faults that control reservoir compartmentalization and hydrocarbon migration pathways (Javanshir et al., 2015). The stratigraphic succession spans from Eocene basement units to Holocene marine sediments, with the Lower Pliocene Productive Series forming the principal hydrocarbon-bearing interval. This sequence comprises a complex assemblage of deltaic, coastal, and prodeltaic facies, organized into multiple lithostratigraphic suites including Gala, Pre-Kirmaki, Kirmaki, Post-Kirmaki, Fasila, Balakhany, Sabunchu, and Surakhany (Abdulla-zada, Vahably, 2021). Each suite contains numerous discrete reservoir horizons, many of which exhibit lateral and vertical heterogeneity, compartmentalization, and varied production histories.

Over seventy years of exploration and production have yielded an extensive body of geological, petrophysical, and geophysical data, enabling detailed assessment of structural architecture, reservoir quality, and hydrocarbon distribution across the field's tectonic blocks (Feyzullayev, Mammadova, 2022). Despite its mature development status, Neft Dashlary continues to serve as a key site for methodological advancements in offshore reservoir modeling and layered production strategies. This study presents an integrated

© Mammadov Huseynaga, Abdulla-Zada Murad, Pogorelova Elena, 2025

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

geological and petrophysical analysis of the Neft Dashlary field, with a focus on the stratigraphic architecture, fault dynamics, reservoir heterogeneity, and distribution of oil-saturated intervals across major suites. The findings aim to contribute to refined reserve estimation and enhanced recovery planning for this iconic offshore oil province (Fig. 1).

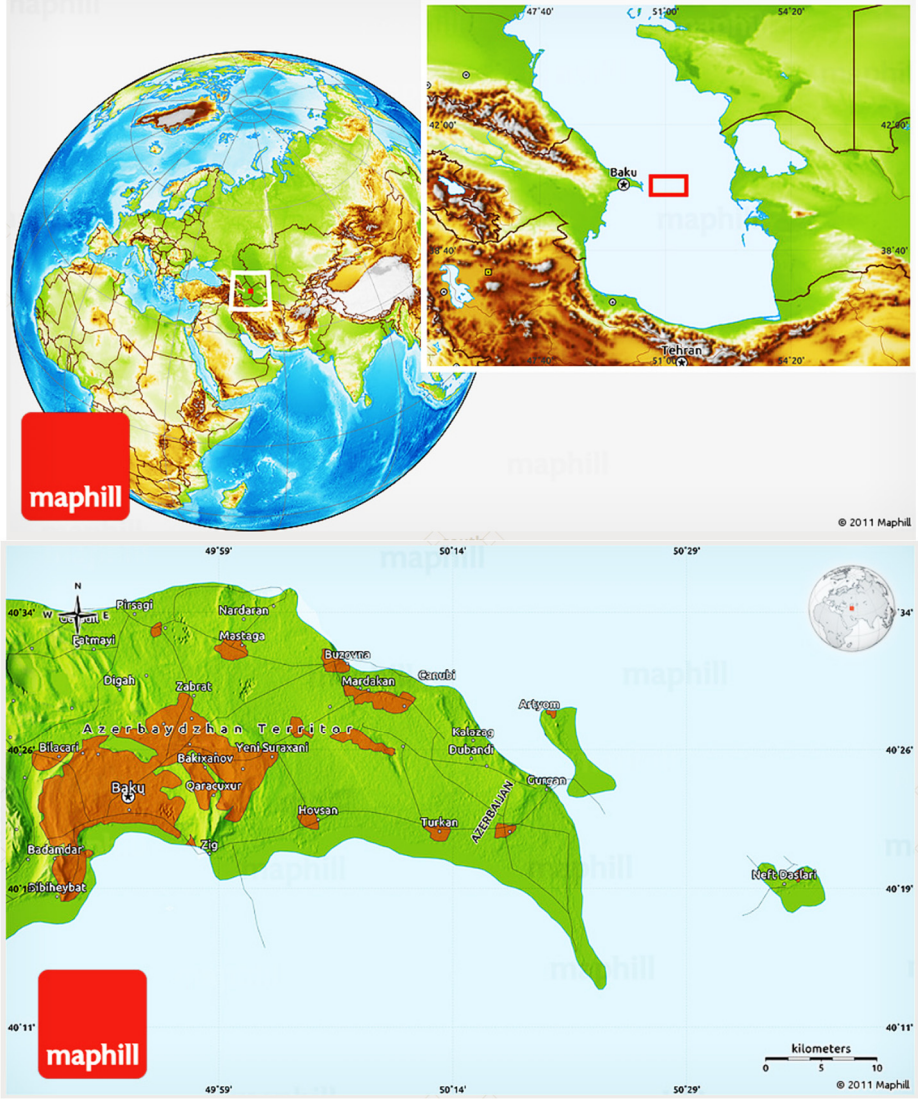



**Fig. 1. Neft Dashlary field location map**

In Baku archipelago industrial deposits were discovered in the VIII horizon of the Balakhkhany suite, the Fasila suite, and the Postkirmaky sandy suite. Deposits of the stratal type are associated mainly with crestal tectonically shielded deposits. A characteristic feature of the oil and gas content of the Productive Serie section is the regular replacement of oil deposits with gas and gas condensate deposits in the direction of the regional immersion of layers (Ganbarova et al., 2024).

The Sangachal-deniz–Duvanny-deniz–Khara-Zira–Bulla-deniz anticline belt is located within the northern part of the Baku Archipelago oil and gas region. A characteristic feature of the tectonic structure the anticline belt is the presence of large longitudinal faults in the axial parts of the structures. Foci of mud volcanic activity are often associated with longitudinal faults. Numerous transverse faults divide the structures into separate tectonic blocks (Alizade et al., 2018).

**Methods**

This study is based on an integrated analysis of geological, geophysical, and production data from the Neft Dashlary offshore oil field. Data from more than 150 wells – including log interpretations, core descriptions, and test results – were used to correlate stratigraphic units and define reservoir architecture (Abduev, Alekberli, 2019). Productive horizons within the Gala, Pre-Kirmaki, Kirmaki, Post-Kirmaki, Fasila, Balakhany, Sabunchu, and Surakhany suites were identified and mapped using standard log suites and structural contouring (Abdulla-zada, Vahably, 2021). Reservoir quality was assessed by combining petrophysical parameters (e. g., porosity, resistivity, fluid saturation) with well performance and historical production (Kerimov et al., 2015). Volumetric estimates of oil initially in place and recoverable reserves were calculated using deterministic methods based on net pay, porosity, saturation, and structural closure (Kerimova, 2023). Interpretation uncertainty was reduced by cross-validating log and test data and applying structural consistency checks across blocks.

***Tectono-Stratigraphic framework.*** The Neft Dashlary oil field exhibits a complex tectono-stratigraphic architecture shaped by the interplay of deep structural deformation and extensive sedimentary accumulation (Glumov et al., 2004). Situated in the northwestern sector of the Absheron–Prebalkhan tectonic uplift zone, the field forms a prominent

culmination within the Khali–Chilov Island–Neft Dashlary anticline system. The core structural element is a northwest–southeast trending, asymmetric brachyanticlinal fold, measuring approximately 11 km in length and 6 km in width (Novruzov, 2022) (Fig. 2).

The fold is distinctly asymmetric, with variable dip angles on opposing limbs. The crest has undergone significant erosion, exposing Productive Series (PS) deposits at the modern seafloor (Pogorelova, 2019). The northwestern pericline is characterized by steep dips (33–45°), while dips in the southeastern pericline range from 22–29°. The southwestern limb is steeper (35–40°) than the more gently inclined northeastern limb (27–30°), indicating differential deformation.

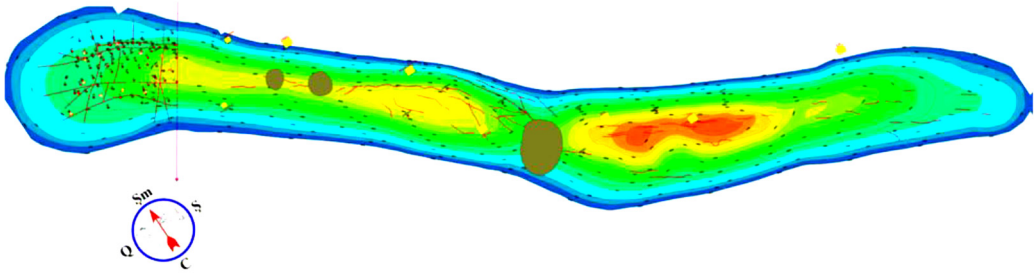



**Fig. 2. Structural map of the Neft Dashlary field (based on Novruzov, 2022)**

Stratigraphically, the succession at Neft Dashlary spans from the Eocene to modern deposits, reaching a total thickness of over 3350 meters (as documented in Well No.1918, Block V). The Paleogene–Neogene system at the base includes the Koun Suite (Eocene), Maikop Suite (Oligocene–Lower Miocene), and Diatom Suite (Middle–Upper Miocene) (Aliyeva, 2004). These units, composed primarily of brecciated clays, marl-bearing sands, and volcaniclastic materials, are revealed in deep exploratory wells and serve as the structural and stratigraphic basement for overlying productive intervals.

The overlying Productive Series (Lower Pliocene), reaching up to 2400 meters in cumulative thickness, is the principal hydrocarbon-bearing interval. It consists of alternating sequences of sand, sandstone, siltstone, and clay, and is subdivided into several suites: Gala, Pre-Kirmaki, Kirmaki, Post-Kirmaki sandy and clayey suites, followed by the Fasila, Balakhany, Sabunchu, and Surakhany suites (Aliyeva, 2004). Each suite exhibits distinct sedimentological characteristics, internal stratification, and reservoir potential. The Gala Suite alone is subdivided into up to eight sand packages (GS-1 to GS-8), with GS-1 to GS-4 being oil-bearing, and displays a marked vertical increase in sand content from base to top (Katz et al., 2000).

Higher in the section, the Fasila and Balakhany suites represent thick sand-dominated intervals with multiple stacked hydrocarbon reservoirs. For example, the Balakhany Suite includes at least seven productive horizons (X through V), each characterized by varying resistivity, sand content, and log responses. These units are critical targets in field development due to their favorable porosity and permeability (Khalilova, Seyidov, 2023).

Post-Productive Series sediments cap the succession and include the Aghjagil Stage (Upper Pliocene), Absheron Stage (Pleistocene), Ancient Caspian deposits, and Modern Caspian sediments. These strata, composed of clay, sand, and bioclastic materials, reflect continued sedimentation in a shallow marine setting and provide clues to the paleoenvironmental evolution of the basin.

Tectonically, the Neft Dashlary structure is segmented by a network of longitudinal and transverse faults. Six major tectonic blocks are delineated by longitudinal faults (designated 1, 2, and 2a) and transverse dislocations (faults 3 through 7), with displacements ranging from 30 m to over 350 m. Notably, transverse fault I–Ia, inferred from abrupt changes in bedding dips (up to 72° in Wells 1 and 6), reflects significant structural disruption and has been confirmed by drilling. Other major faults, such as II–II and III–III, traverse the structure, altering reservoir continuity and hydrocarbon migration pathways.

Structural mapping indicates that the fold is separated from the adjacent Palchig Pilpilasi uplift by a shallow saddle, further emphasizing its brachyanticlinal geometry. Additionally, a mud volcano has been identified near Site 262, at the Koun–Maikop contact zone. Over 30 exploratory wells were drilled to delineate the spatial extent of the breccia, revealing the field's genetic affiliation with diapiric tectonism (Khuduzade et al., 2016).

***Reservoir Properties.*** The reservoir characteristics of the Neft Dashlary field reflect the diverse lithological composition and sedimentary dynamics of the Lower Pliocene Productive Series, which hosts the majority of hydrocarbon accumulations. A comprehensive assessment based on 1,453 core samples collected from 357 wells provides detailed insights into the petrophysical behavior of the principal reservoir units (Bagirov, Hajiyev, 2019). These include the Gala, Pre-Kirmaki, Kirmaki, Post-Kirmaki sandy, Post-Kirmaki clayey, Fasila, Balakhany, Sabunchu, and Surakhany suites.

Reservoirs within the Gala Suite (GS) are composed primarily of poorly cemented, fine-grained sandstones and siltstones (Duppenbecker et al., 2009). Analysis of 342 samples from 31 wells indicates porosities ranging from 12 % to 49 % (average: 23 %), with permeability values spanning 0.001–1.187 μm² (average: 0.135 μm²). These reservoirs contain up to 50 % silt and exhibit moderate carbonate content (average: 10 %), underscoring their mixed composition and variable quality.

The Pre-Kirmaki Suite (PKS), evaluated from 220 samples across 69 wells, is characterized by high sand content (67 %) and moderate porosity (12–40 %; average: 24 %). Permeability ranges widely, reaching up to 3.920 μm², with an average of 0.138 μm². These intervals exhibit favorable reservoir properties, enhanced by relatively low clay content (25 %) and modest carbonate concentrations (average: 9.4 %).

In contrast, the Kirmaki Suite (KS), based on 100 samples from 42 wells, presents more heterogenous reservoir properties. Average porosity remains comparable (24 %), but permeability varies significantly across its sub-units. The KS-1 interval shows the lowest permeability (0.036 μm²), while KS-2 exhibits more favorable values (up to 0.207 μm²), linked to its improved sorting and coarser texture (Mammadov, 2010).

The Post-Kirmaki sandy Suite (PKsS), represented by 44 samples from 18 wells, contains high-quality reservoirs.

These sands exhibit porosities averaging 25 % and permeability values up to 0.257 μm². The relatively low clay fraction (~25 %) and consistent petrophysical behavior make UKSS an attractive development target.

The overlying Post-Kirmaki clayey Suite (PKcS), though dominated by clayey siltstones, retains moderate reservoir quality. Based on 36 samples, porosity and permeability average 25 % and 0.085 μm², respectively. Carbonate content ranges from 3.4 % to 26 %, indicating a diverse diagenetic history (Abrams, Narimanov, 1997).

The Fasila Suite (FS), derived from 115 samples across 46 wells, offers some of the most favorable properties in the field. With porosities up to 37 % (average: 27 %) and permeability reaching 2.0 μm², this unit represents a key reservoir horizon. Sand content exceeds 65 %, while carbonate content remains moderate (average: 10 %).

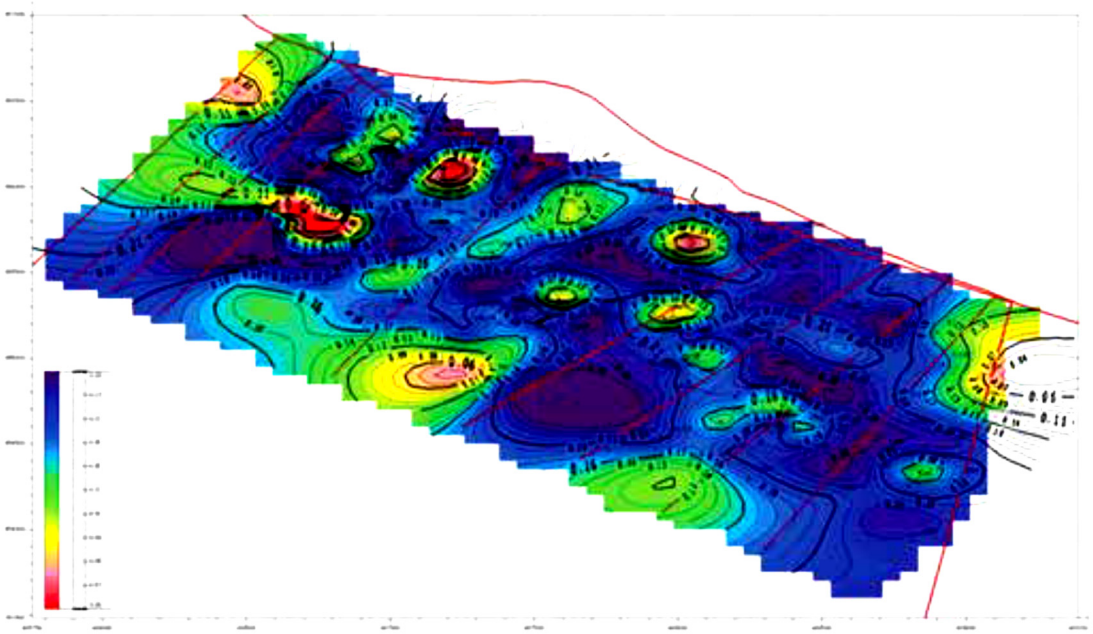


**Fig. 3. Decline in porosity values from the structural crest toward the periclinal zones, as well as across the areal extent of the reservoir**

Reservoirs in the Balakhany Suite (BalS), examined through 207 samples from 59 wells, are consistently porous (up to 40 %) and moderately permeable (Javanshir et al., 2015). The average carbonate content is approximately 10 %, and internal horizons (e. g., X, IX, VIII) show variable but often high flow capacity, supporting their long-standing role in field production.

Statistical analysis of the full sample set reveals the following:

- Granulometric composition was determined for 1,236 samples. Clay content varies from 1.8 % to 50 %, averaging 24–30 %. Maximum values occur in the KS Suite, while the PKS, PKsS, and BalS exhibit the lowest clay contents.
- Carbonate content, based on 1,373 measurements, ranges from 1 % to 30 %, with localized spikes up to 40 %. The average across all productive units lies between 10 % and 15 %, with higher values in GS and KS.
- Porosity was measured in 1,030 samples, ranging from 2 % to 45 %, with suite averages between 18 % and 28 % (Fig. 3).
- Permeability, assessed from 504 samples, ranges from 0.0001 to 3.920 μm². PKS-2a exhibits the highest values, while KS-1 is the least permeable.

A permeability threshold of 0.001 μm² is adopted to distinguish reservoir from non-reservoir intervals. Empirical porosity-permeability plots show that effective reservoir behavior is maintained when:

- Porosity exceeds 10 % for the PKS, PKsS, and FS suites.
- Porosity exceeds 12 % for GS, KS, and PKcS suites.

Accordingly, the following petrophysical criteria are recommended for defining reservoir quality in the Neft Dashlary field:

- For PKS, KS, PKsS, FS, and BalS: porosity >10 %, permeability >0.001 μm², carbonate <25 %, and clay content <48 %.
- For GS, KS, and PKcS: porosity >12 %, permeability >0.001 μm², carbonate <27 %, and clay content <48 %.

***Distribution characteristics of hydrocarbon accumulations.*** The Neft Dashlary field is multilayered, with hydrocarbons occurring in as many as 26 stratigraphic intervals within the Productive Series. The thickness of oil-bearing formations varies significantly across the structure, with minimum values observed in the northwestern blocks (e. g., 67.7 m in Block I) and maximum values in the southeastern blocks (e. g., 348.6 m in Block III).

Hydrocarbon-bearing intervals have been identified in nearly all productive suites and horizons:

- Surakhany Suite: 2 horizons (I and II)
- Sabunchu Suite: 3 horizons (II, III, IV)
- Balakhany Suite: 7 horizons (V, VI, VII, VIIa, VIII, IX, X)
- Fasila, Post-Kirmaki clayey, and Post-Kirmaki sandy Suites: 1 object each
- Kirmaki Suite: 3 horizons (KS, KS-1, KS-2)
- Pre-Kirmaki Suite: 4 objects (PKS-1, PKS-1a, PKS-2, PKS-2a)
- Gala Suite: 4 productive sand packages (GS-1 through GS-4)

These reservoirs are often confined by lithological and tectonic seals, with several exhibiting stratigraphic pinch-

ISSN 1728-3817

outs or lateral lithofacies transitions. The nature of these traps reflects a combination of structural and lithological controls on hydrocarbon entrapment.

Table 1 summarizes the gross and net effective oil-saturated thicknesses of the principal reservoir units. The net oil-bearing thickness generally correlates inversely with increasing clay content. Cumulatively, net thicknesses are greatest in the downthrown southeastern flanks of the structure.

Each hydrocarbon-bearing unit consists of rhythmically alternating sandy siltstones, clays, and silty mudstones, with individual sand bodies ranging from 1–2 meters to as much as 18 meters in thickness. Interbedded shale barriers range from 2–4 meters within productive zones, increasing to 8–20 meters between separate reservoir bodies (Fig. 4).

The distribution of oil-bearing objects by block reveals the highest concentration in Block III (24 objects), followed by Blocks IV and V (21 objects each), Block II (15), Block Ia (12), and Block I (8).

Notably, deeper sequences beneath the Productive Series – including the Koun, Maikop, Diatom, and Pontian deposits – were penetrated by 25 wells. While these older formations were fully characterized, they did not demonstrate significant hydrocarbon potential in this field (Mammadov, 2015).

Hydrocarbons within the Neft Dashlary field occur primarily in solution gas form. However, minor accumulations of free gas have been reported in a few wells, particularly within GS-1 (Blocks Ia and IV) and GS-2 (Blocks III and IV), where limited gas production has been documented.

*Table 1*

**Variation in thickness and effective oil saturation of productive intervals**

| Horizon/Suite | Gross Thickness (m) | Avg. Gross | Net Effective Thickness (m) | Avg. Net |
|---|---|---|---|---|
| GS | 193–380[x] | 274 | 29,0–101,8 | 64.9 |
| PKS | 72–135 | 110 | 39,3–78,1 | 63.9 |
| KS | 165–350 | 286 | 22,0–35,2 | 27.9 |
| PKsS | 18–46 | 31 | 10–19 | 18.2 |
| PKcS | 90–220 | 147 | 6–8 | 6.3 |
| FS | 56–105 | 78 | 18–34 | 28.7 |
| X | 30–70 | 50 | 9–26 | 24.3 |
| IX | 38–71 | 55 | 11–14 | 11.5 |
| VIII | 35–70 | 55 | 15–20 | 15.6 |
| VIIa | 30–76 | 50 | 5,8–12,5 | 11.5 |
| VII | 32–70 | 57 | 16–20 | 17.0 |
| VI | 95–153 | 124 | 14–21 | 19.0 |
| V | 70–105 | 84 | 10–14 | 12.6 |
| IV | 111–155 | 141 | 6–11 | 11.0 |
| III | 20–43 | 30 | 6,0 | 6.0 |
| II | 30–55 | 35 | 5,0 | 5.0 |
| I | 11–55 | 30 | 4,0 | 4.0 |
| $I^{I}$ (SurS) | 30–45 | 33 | 4,0 | 4.1 |

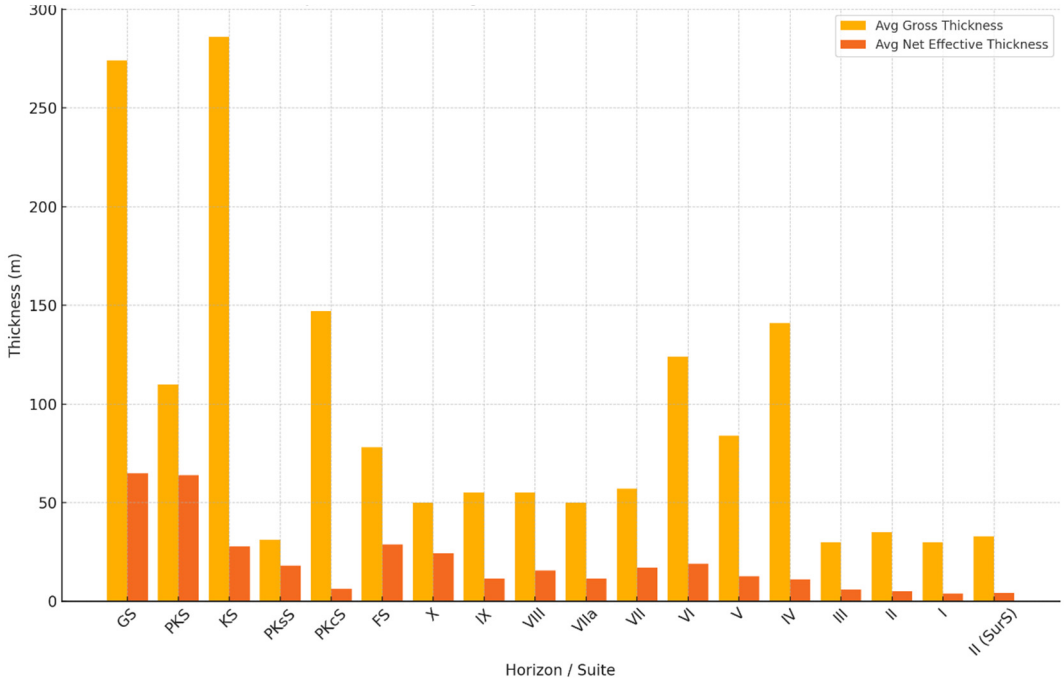



**Fig. 4. Comparison of average gross and net effective thicknesses**

## Results

The stratigraphic succession of Lower Productive Serie sediments of the Neft Dashlary field includes a wide range of reservoir types, from shallow-marine sands to deltaic and prodelta facies, each demonstrating varying degrees of lateral continuity, vertical heterogeneity, and hydrocarbon saturation.

The Gala Suite (GS) is stratigraphically divided into four distinct horizons: GS-1 through GS-4. Industrially significant

oil accumulations have been identified across all tectonic blocks of the field, with the most productive intervals associated with horizons GS-1 and GS-2.

The lithological and reservoir properties of GS deposits exhibit considerable heterogeneity across the structure. Detailed correlation of well log data from wells in Block V (e. g., Wells 1778, 1967, 2078, 1749, 2032, 1728, and 845) revealed lateral facies variability. In the northwestern portion of Block Ia (e. g., Well 1716), only GS-2 is oil-saturated, while GS-1 and GS-3 are composed predominantly of clay-rich facies. Conversely, in the southeastern area (e. g., Well 1501), all four GS horizons are productive.

GS-4 was the initial oil-bearing horizon discovered in the Neft Dashlary field, delineating a productive zone primarily along the southeastern (Blocks Ia, II, and IV) and partially the north-northeastern flanks of the structure. The initial producing wells reported oil flow rates of 40–150 tons/day. The oil-bearing zone associated with GS-4 extends approximately 3,750 meters southeastward and 2,200 meters northwestward.

In the southeastern crestal region (Block IV), particularly near Wells 262, 1835, and 1836, GS-4 transitions into non-reservoir clayey facies, resulting in an unproductive central zone (Fig. 5).




**Fig. 5. Oil saturation distribution map for the GS-4 horizon**

Oil production from GS-3 has proven variable. While test results from some wells (e. g., Wells 35 and 515) have indicated the presence of formation water, geophysical analyses confirm that Blocks I and V are largely non-productive in this interval. Notably, on 17 February 1955, Well 203 (Block III) produced oil from GS-3 at a rate of 53 tons/day with a wellhead pressure of 4.8 MPa. Subsequent development (e. g., Wells 255, 296, and 467) delineated the productive limits of the reservoir in Blocks Ia, II, and IV. The oil-bearing trend of GS-3 spans approximately 7,100 meters southeastward and 900 meters northwestward.

The lateral extent of oil saturation in GS-3 is largely determined by lithological constraints. In the southeastern flank, sand-rich intervals pinch out into impermeable clay, creating a distinct boundary between productive and non-productive zones (Fig. 6). The width of this non-productive zone varies from 100–150 meters in the central area to 600–850 meters toward the east and west.

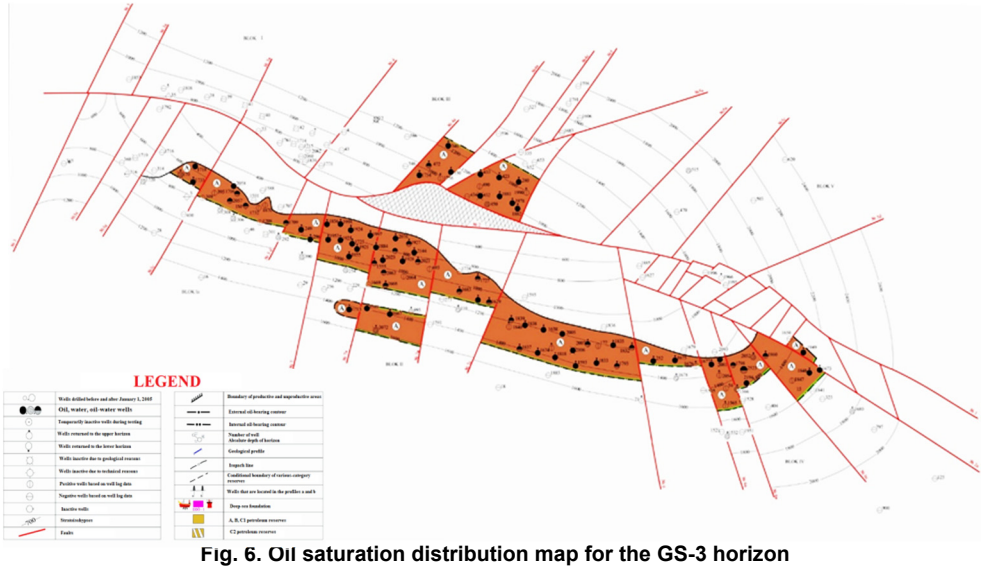



**Fig. 6. Oil saturation distribution map for the GS-3 horizon**

ISSN 1728-3817

In the north-northeastern flank, GS-3 is productive only within Block III. Well log and production data from Wells 430 and 434 indicate a narrow water-bearing zone.

GS-2 is oil-bearing across the southeastern flank (Blocks Ia, II, and IV) and partially in the north-northeastern flank (Blocks I and III). Commercial oil production was first recorded from Well 51 on 16 September 1951 at a rate of 50 tons/day. Follow-up production from multiple wells (e. g., Wells 3, 41, 53, 90, 243, and 350) confirmed the lateral continuity of this reservoir. The productive zone in GS-2 spans approximately 7,800 meters southeastward and 3,600 meters northwestward. Minor quantities of free gas were encountered in several wells (e. g., Wells 17, 197, 199, and 201 in Block IV and Well 711 in Block III).

The majority of reserves in GS-2 are concentrated in Block II, which features a vertical closure of up to 1,000 meters (Fig. 7).

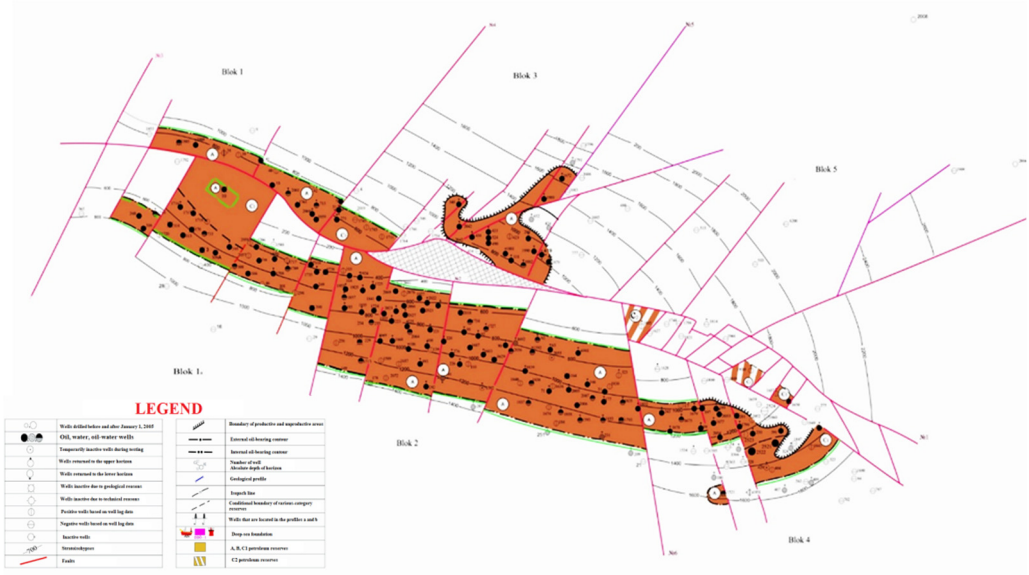



**Fig. 7. Oil saturation distribution map for the GS-24 horizon**

GS-1 is oil-bearing in all blocks except Block I. Initial production was established on 21 January 1952 from Well 15 (Block II), yielding 50 tons/day at a wellhead pressure of 2.7 MPa.

Block I exhibits low apparent resistivity values (below 4.5 Ohm·m), and testing in Well 1808 yielded formation water. In Block Ia, Wells 1710 and 2051 produced oil, while Wells 1710 and 1718 produced mixed oil and water. Minor gas occurrences were documented in Wells 1784 (Block Ia), 243, and 267 (Block IV).

Similar to GS-2, the primary reserves of GS-1 are concentrated in Block II, which displays significant structural closure and reservoir continuity (Fig. 8).




**Fig. 8. Oil saturation distribution map for the GS-1 horizon**

The Pre-Kirmaki Suite (PKS) is stratigraphically subdivided into four productive horizons: PKS-2a, PKS-2, PKS-1a, and PKS-1. Commercial oil accumulations have been identified in all tectonic blocks except Block I (Fig. 4.1.2.1–4.1.2.4). The apparent resistivity of these horizons generally ranges from 10 to 20 Ohm·m, whereas in Block I it ranges from 4 to 7 Ohm·m. As a result, exploitation was long delayed, and only in 1984 were two wells (1714 and 1715) tested in PKS-1, yielding oil-stained water. In the remaining blocks, extensive well testing has confirmed oil

saturation throughout the suite, with minimal variation in hydrocarbon contact contours.

In Blocks II, IV, and V, a non-productive zone has been identified in the southeastern crestal areas. This is attributed to facies pinch-outs of PKS-2a or substitution by non-reservoir rocks (PKS-2). The relatively dense well distribution in these zones has enabled precise delineation of reservoir limits.

PKS-2a is oil-bearing in Blocks II, III*, IV, V, and partially in Block Ia. Initial commercial oil flow was recorded on 5 July 1951 from Well 17 (Block IV) at 80 tons/day with a 7 mm choke and 9.5 MPa wellhead pressure. Subsequent development (e. g., Wells 23, 55, 67, 62, 69, and 70) defined oil-bearing areas in Blocks II through V. In the southeastern flank, the productive zone extends 6,000 meters longitudinally, with a width of 200–1,100 meters and vertical closure of 150–1,000 meters. Later, Wells 1711, 1712, 1716, and 1717 confirmed a smaller oil-bearing area in Block Ia.

The PKS-2a reservoir is bounded by an oil-water contact in the deeper parts of the structure and by tectonic faults elsewhere. In Block V, the reservoir is partially truncated by a non-productive zone along the crest. In some wells, PKS-2a is not present in the well section. The boundary between productive and non-productive zones is defined by interpolating between producing wells and those considered non-productive based on well logs. The dense well network in Block V has facilitated detailed mapping of the reservoir extent (Fig. 9).




**Fig. 9. Oil saturation distribution map for the PKS-2a horizon**

PKS-2 has been in commercial production since 1952 and is productive in Blocks II, III, IV, and V. In Block I, poor reservoir quality (low resistivity) has precluded successful development. In Block Ia, testing in Well 1711 yielded clean formation water (Fig. 10). The main reserves of PKS-2 are concentrated in Blocks II through V, with oil-bearing zones extending 5,000 meters southeastward and 4,000 meters northwestward.

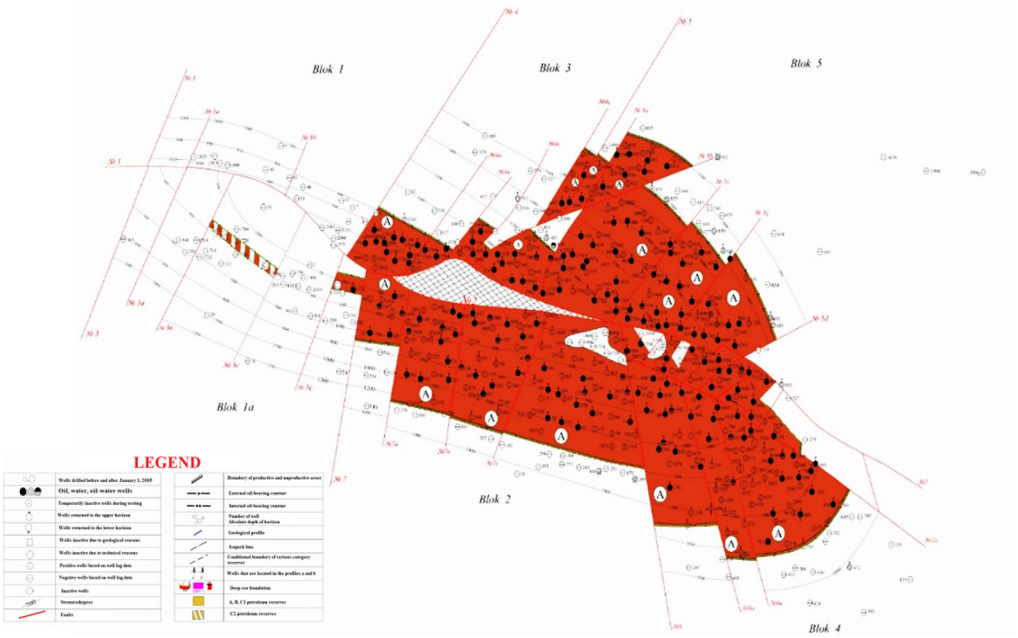



**Fig. 10. Oil saturation distribution map for the PKS-2 horizon**

ISSN 1728-3817

PKS-1a first yielded oil on 14 December 1951 from Well 32 (Block III), producing 70 tons/day with a 9 mm choke and 2.6 MPa wellhead pressure. Subsequent testing of Wells 73, 116, 153, 236, 260, and 424 delineated productive zones in Blocks II through V. Limited oil-bearing zones were also detected in Block I (e. g., Wells 1714, 1715, 2059) and Block Ia (e. g., Wells 1712, 1716, 1710, 1711, 1739, 1884), based on test results and log interpretations (Fig. 11). The principal reserves of PKS-1 are located in Blocks II through V, where the oil-bearing zones span 5,000 meters and reach up to 900 meters in vertical closure.

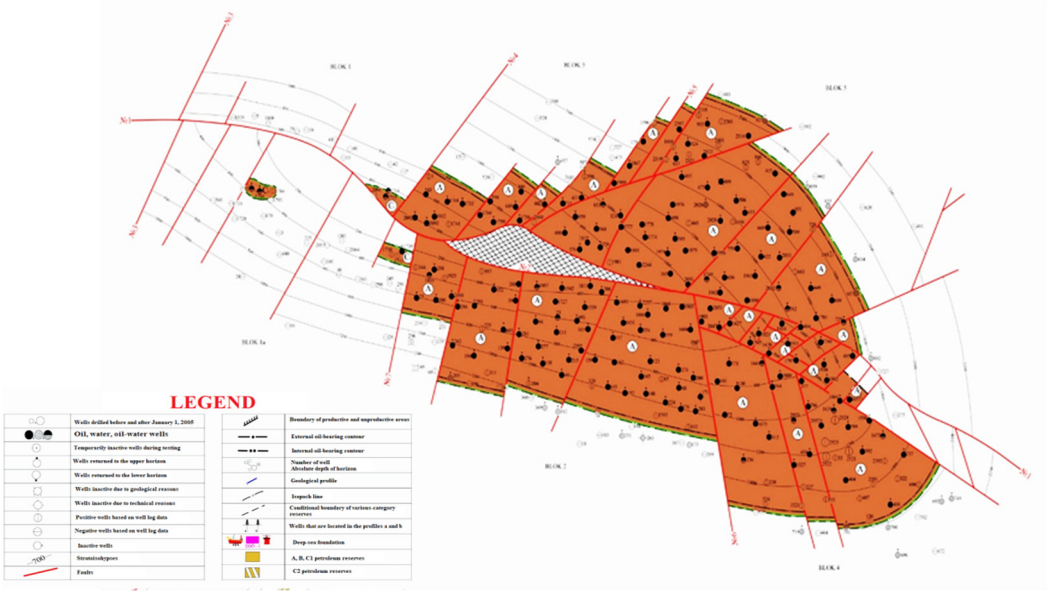



**Fig. 11. Oil saturation distribution map for the PKS-1a horizon**

PKS-1 is a thin oil-saturated layer located near the top of the Pre-Kirmaki Suite and has only been identified in Block II. In other blocks, due to the absence of a separating shale bed, this horizon merges with PKS-1 (Fig. 12). The first production was achieved on 10 February 1957 from Well 274 (Block II), which produced 62 tons/day through a 6 mm choke at a pressure of 2.4 MPa. Wells 266 and 282 further delineated the PKS-1 reservoir, which was subsequently put into commercial development. The productive area in Block II measures approximately 3,200 by 1,100 meters, with a structural closure of up to 1,000 meters.

The Kirmaki Suite (KS) is stratigraphically subdivided into three horizons: KS-2, KS-1, and KS. Commercially significant oil accumulations have been identified in all tectonic blocks except Block I. Hydrocarbon saturation is more prominent in the lower, sandier units of the suite, while the upper part comprises thicker intervals of non-reservoir lithologies.

KS-2 is oil-bearing in Blocks Ia, II, III, IV, and V. Reservoirs in Block I are water-saturated according to borehole geophysical surveys, and no testing has been conducted in this block. In the southeastern flank, the productive area extends approximately 6,600 meters, and in the northwestern flank about 4,900 meters. The width varies from 180 to 2,000 meters in the southeast and 300 to 1,750 meters in the northwest, with a structural closure reaching up to 1,200 meters (Fig. 13).

KS-1 is productive in all blocks except Block I. In recent years, the oil-bearing limits in Blocks III, IV, and V have been significantly expanded based on new well data (Fig. 14).

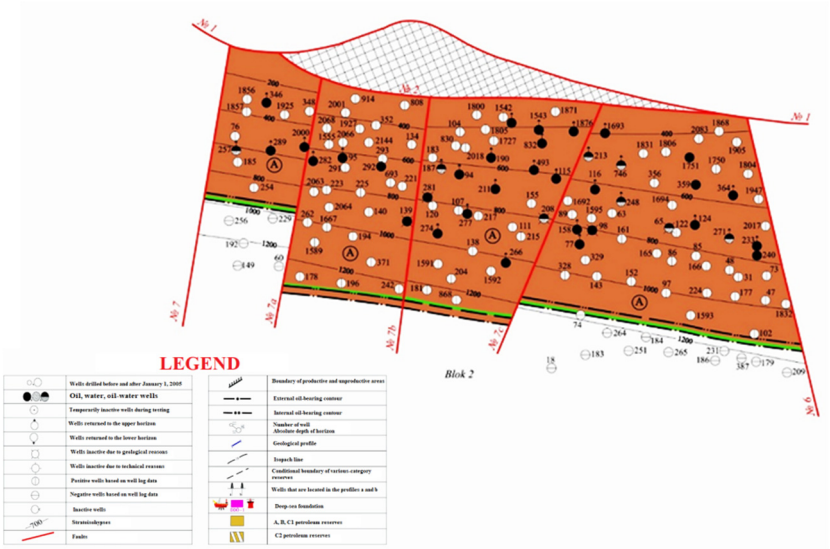



**Fig. 12. Oil saturation distribution map for the PKS-1 horizon**

KS – is primarily productive in Block II, where it forms a monolithic reservoir with a vertical extent of up to 800 meters. In other blocks, limited oil shows were encountered in a few wells, suggesting residual hydrocarbon presence. In Block Ia, only Well 1733 was tested and yielded formation water. Well log interpretations from Wells 3, 313, 316, 380, 1712, 1720, 1588, and 1710 did not indicate productive intervals (Fig. 15).

In Block III, seven wells (345, 438, 569, 583, 1742, 1745, and 1789) were successfully tested, all yielding clean oil without water. In Blocks IV and V, wells such as 1570, 1966 (Block IV) and 645, 823, 843 (Block V) have also been tested. While two wells (645 and 843) produced oil with minor water, the others yielded clean oil.

These results, along with geophysical interpretations, confirm the presence of a small isolated reservoir in Block III (approximately 1,300×300 meters) and local accumulations in Blocks IV and V.




**Fig. 13. Oil saturation distribution map for the KS-2 horizon**

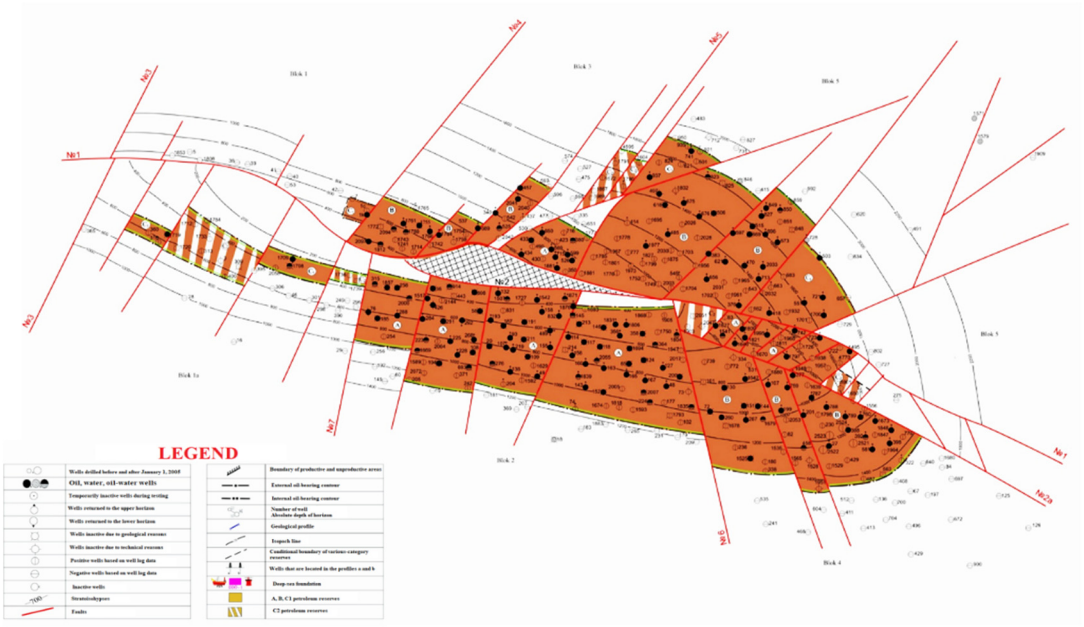



**Fig. 14. Oil saturation distribution map for the KS-1 horizon**




**Fig. 15. Oil saturation distribution map for the KS horizon**

The Post-Kirmaki Sandy Suite (PKsS) represents a single productive interval with a thickness ranging from 20 to 50 meters. In Blocks I and Ia, the PKsS deposits have been eroded and exposed on the seabed; the associated reservoirs are water-saturated, and no testing has been performed. However, log data from Well 184 (Block Ia) suggests potential oil saturation.

In Block II, the PKsS has been tested in 37 wells. Of these, eight wells (30, 49, 95, 103, 122, 279, 280, and 281) produced oil, two wells (48 and 758) yielded oil with water, and the remainder produced only formation water. This irregular distribution of hydrocarbon saturation in Block II suggests disintegration of a once-unified reservoir. In contrast, testing in Blocks III, IV, and V confirms that the oil saturation is consistently distributed throughout the suite. The most prolific oil-bearing area is in Block V, where the structural closure reaches up to 1,000 meters.

Initial oil production from the PKsS was recorded on July 30, 1955, in Well 342 (Block III), which yielded 60 tonnes per day through a 6 mm choke under a buffer pressure of 4 MPa. Subsequent testing in Wells 134, 135, 275, 297, 473, 475, and others delineated discrete oil accumulations across Blocks III, IV, and V (Fig. 16).

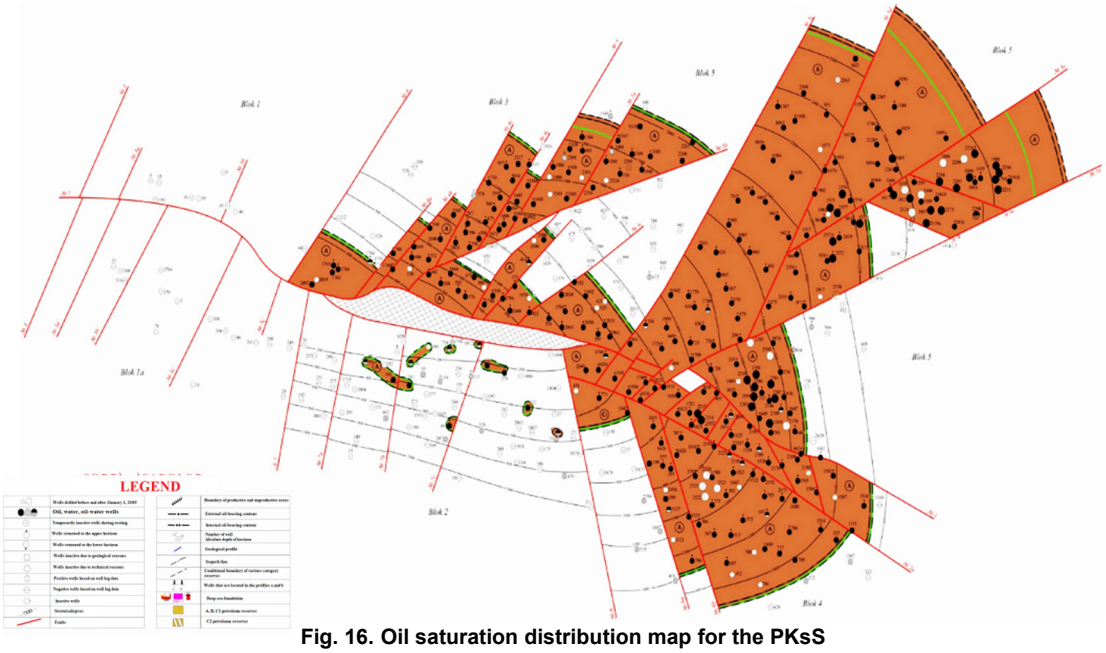



**Fig. 16. Oil saturation distribution map for the PKsS**

The Post-Kirmaki Clayey Suite (PKcS) has a thickness ranging from 158 to 220 meters, with an average of 147 meters. In Blocks Ia and II, these deposits are exposed at the seabed and have been eroded along the structural crest.

Industrial-scale reservoirs have been confirmed through multiple wells in Blocks III, IV, V, and to a lesser extent, Block I. The reservoir in Block II is lithologically restricted and localized around Wells 95, 282, 286, 154, and others. The lateral distribution of oil in the PKcS is largely governed by lithological controls. Oil accumulations are primarily associated with sandy layers at the base of the suite, enclosed within dominant clayey facies. As Blocks I and Ia are composed predominantly of clays, they are considered non-prospective (Fig. 17).

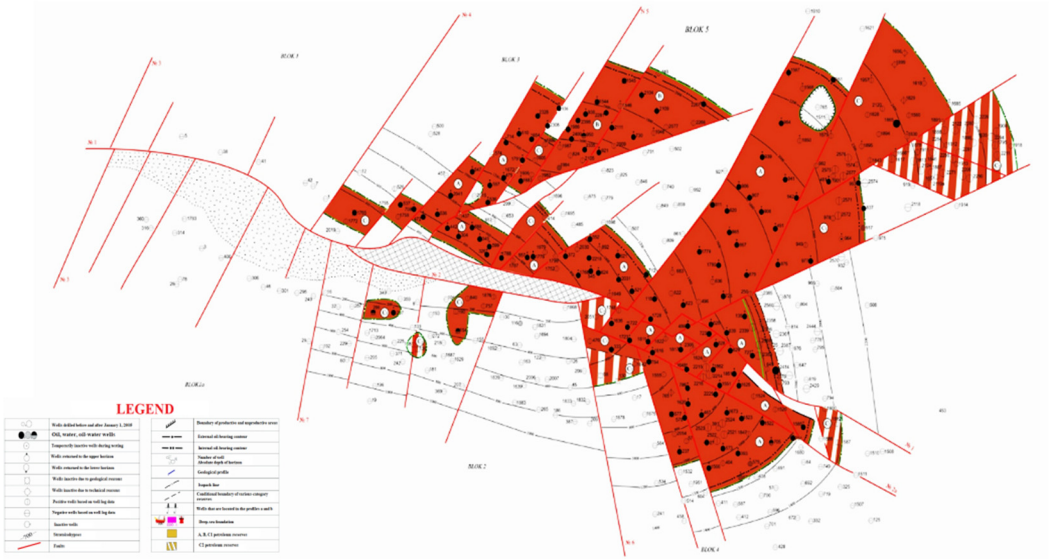



**Fig. 17. Oil saturation distribution map for the PKcS**

The first oil discovery in the PKcS occurred on March 19, 1962, in Well 342 (Block III), which produced 30 tonnes per day through a 5 mm choke under 2.8 MPa buffer pressure. Wells 473, 527, 552, 557, and others later confirmed the productivity in Blocks IV and V. Initial production rates were generally low, ranging from 3 to 30 tonnes per day.

The distribution of reserves reflects structural and stratigraphic architecture. Block V contains over half of the field's total recoverable reserves, owing to its large closure, multiple stacked reservoirs, and high net-to-gross ratios. The central blocks (II, III) also contribute significantly, while Block I consistently shows poor saturation and marginal reservoir development. These findings underscore the importance of integrating geological and geophysical data to define stratigraphic traps and improve recovery efficiency.

**Discussion and conclusions**

The geological and petrophysical evaluation of the Neft Dashlary offshore oil field has revealed several key insights essential for optimizing development and managing remaining reserves. The field's hydrocarbon potential is primarily hosted within a multilayered Pliocene Productive Series, comprising more than 25 oil-bearing intervals whose distribution is governed by both structural dislocations and lithofacies variations.

The most productive horizons are found within the Gala and Pre-Kirmaki suites, particularly in structurally favorable Blocks II, III, IV, and V. In contrast, Block I consistently exhibits low porosity, low permeability, and reduced resistivity, resulting in poor hydrocarbon saturation. The spatial distribution of reserves strongly correlates with structural closures, net oil-bearing thickness, and the proportion of sandy versus clay-rich facies.

Structural segmentation by longitudinal and transverse faults significantly influences reservoir compartmentalization and the formation of localized traps. Stratigraphic pinch-outs, lithological transitions, and facies wedge-outs are common within multiple productive horizons and play a critical role in controlling hydrocarbon entrapment and vertical reservoir continuity.

**Authors' contribution:** Huseynaga Mammadov – writing, investigation, methodology, formal analysis, conceptualization, data curation, supervision; Murad Abdulla-zada – investigation, writing.

**Sources of funding.** This study did not receive any grant from a funding institution in the public, commercial, or non-commercial sectors.

**References**

Abdulla-zada, M. C., & Vahably, N. F. (2021). Lithofacial analysis of sediments of the Productive Series lower section based on geophysical and core investigations. In *Geomodel 2021* (Vol. 2021, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202157069

Abduev, A. A., & Alekberli, J. I. (2019). Substantiation of prospectivity of Pre-Kirmaki suite in Neft Dashlary field. *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 9, 34–38.

Abrams, M. A., & Narimanov, A. A. (1997). Geochemical evaluation of hydrocarbons and their potential sources in the western South Caspian depression, Republic of Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 14(4), 451–468. https://doi.org/10.1016/S0264-8172(97)00011-1

Alizade, A. A., Guliyev, I. S., Mamedov, P. Z., Alieva, E. G., Feyzullaev, A. A., & Huseynov, D. A. (2018). *Productive series of Azerbaijan* (Vol. 1). Nedra [in Russian]. [Ализаде, А. А., Гулиев, И. С., Мамедов, П. З., Алиева, Э. Г., Фейзуллаев, А. А., & Гусейнов, Д. А. (2018). *Продуктивная серия Азербайджана* (т. 1). Недра].

Aliyeva, E. G. (2004). Depositional environment and reservoir architecture of the Productive Series VII-V horizons in the Alyat ridge offshore part (Alyat-deniz, Bulla-deniz fields). Baku, 41–49. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4290.6006

Bagirov, B. A., & Hajiyev, A. M. (2019). Further development possibilities for nonuniform reservoirs: Kirmaku Suite, Neft Dashlary Oil Field, Azerbaijan. In *Third International Conference on Geology of the Caspian Sea and Adjacent Areas* (Vol. 2019, No. 1, pp. 1–6). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201952033

Duppenbecker, S. J., Riley, G. W., Abdullayev, N. R., Green, T. J., & Doran, H. (2009, May). Petroleum systems dynamics of the South Caspian Basin. *AAPG Hedberg Research Conference*, Napa, California, U.S.A. https://doi.org/10.3997/2214-4609.20146084

Feyzullayev, A. A., & Mammadova, I. M. (2022). On the influence of seismotectonic processes on the dynamics of oil and gas production rate and their applied significance (case study: The South Caspian basin). *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 58 (Suppl 1), 140–158. https://doi.org/10.1134/S0001433822130035

Ganbarova, S., Zeynalova, S., & Zahidova, T. (2024). The risk of change in the thickness, sand and oil-gas content of the Productive series sediments on the northern slope of the South Caspian depression. *Reliability: Theory & Applications*, 19(SI 6 (81)), 1501–1512.

Glumov, I. F., Malovitsky, Ya. P., Novikov, A. A., & Senin, B. V. (2004). *Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea*. Nedra-Business Center [in Russian]. [Глумов, И. Ф., Маловицкий, Я. П., Новиков, А. А., & Сенин, Б. В. (2004). *Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря*. Недра-Бизнес-Центр]. https://doi.org/10.15593/2712-8008/2025.2.5

Javanshir, R. J., Riley, G. W., Duppenbecker, S. J., & Abdullayev, N. R. (2015). Validation of lateral fluid flow in an overpressured sand-shale sequence during development of Azeri-Chirag-Gunashli oil field and Shah-Deniz gas field: South Caspian Basin, Azerbaijan. *Marine and Petroleum Geology*, 59, 593–610. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2014.07.019

Katz, B., Richards, D., Long, D., & Lawrence, W. (2000). A new look at the components of the petroleum system of the South Caspian Basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 28(4), 161–182. https://doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00076-0

Kerimov, V. Yu., Guliyev, I. S., Guseinov, D. A., Lavrenova, E. A., Mustayev, R. N., Osipov, R. N., & Serikova, U. S. (2015). *Forecasting of Oil and Gas Potential in Regions with Complex Geological Structure*. Nedra [in Russian]. [Керимов, В. Ю., Гулиев, И. С., Гусейнов, Д. А., Лавренова, Е. А., Мустаев, Р. Н., Осипов, Р. Н., & Серикова, У. С. (2015). *Прогнозирование*

*нефтегазоносности регионов со сложным геологическим строением*. Недра].

Kerimova, K. A. (2023). Study of petrophysical parameters of productive series by use of well data. *Geophysical Journal*, 45(3), 135–142. https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282421

Khalilova, L. N., & Seyidov, V. M. (2023). Evolution of hydrocarbon deposits in the South Caspian Basin. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(3), 126–134. https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282420

Khuduzade, A. I., Akhundov, S. K., & Najafov, R. M. (2016). Structural-Tectonic peculiarities of the north-western part of South Caspian. *Seismoprognosis observations in the territory of Azerbaijan*, 13(1).

Mammadov, G. A. (2015). On the role and genetic significance of biomarkers in oil geochemistry. *Proceedings of the Higher Educational Institutions of Azerbaijan, Baku*, 4, 7–12.

Mammadov, G. A. (2010). On the natural factors influencing the composition of gas condensates. *Proceedings of the Higher Educational Institutions of Azerbaijan*, 3, 16–21.

Novruzov, H. (2022). *Development scenarios and risk assessment of "Neft Dashlari" field* [Master's thesis, Khazar University, Azerbaijan].

Pogorelova, Ye. Yu. (2019). Geotectonic aspects of oil and gas potential of the intermountain segment of the Black Sea-Caspian Sea region. *Naukovyi Visnyk NHU*, 1, 5–12. https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/1

**Отримано редакцією журналу / Received: 02.07.25**
**Прорецензовано / Revised: 08.07.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Гусейнага МАМЕДОВ, канд. геол. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0001-6199-3892**
**e-mail: huseynaqa.mammadov@asoiu.edu.az**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

**Мурад АБДУЛЛА-ЗАДЕ, д-р філософії (науки про Землю)**
**ORCID ID: 0009-0001-4150-8340**
**e-mail: murad.abdullazade@asoiu.edu.az**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

**Олена ПОГОРЄЛОВА канд. геол. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0002-2412-4441**
**e-mail: yelena.pogorelova@asoiu.edu.az**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

# КАСПІЙСЬКИЙ ПІОНЕР: СТРУКТУРНА СКЛАДНІСТЬ І РОЗПОДІЛ ВУГЛЕВОДНІВ У ШЕЛЬФОВОМУ РОДОВИЩІ НАФТОВІ КАМЕНІ

**Вступ.** ***Нафтогазове родовище Нафтові Камені (Neft Dashlary), розташоване у південно-східному секторі Каспійського моря, є унікальним як з геологічного, так і з історичного погляду. Це перше у світі шельфове родовище, освоєне шляхом буріння зі спеціально побудованих морських платформ. Геологічно воно приурочене до Абшеронсько-Балаханської тектонічної зони підняття та розташоване на брекчіантиклінальній складці північно-західно-південно-східного простягання. Основна нафтогазонасичена товща – це нижньопліоценова Продуктивна серія, представлена багатошаровими дельтовими, прибережними та мілководно-морськими фаціями. Незважаючи на тривалу історію розробки, родовище залишається актуальним об'єктом для переоцінки в контексті вивчення різнотипних колекторів, тектонічної сегментації та стратиграфічної складності, що відкриває перспективи для підвищення нафтовіддачі.***

**Методи.** ***У дослідженні використано комплексний підхід, що включає геологічний, геофізичний та петрофізичний аналіз даних понад 150 свердловин. Узагальнено результати інтерпретації геофізичних каротажів, описів кернів та результатів випробувань. Колекторські властивості визначались за даними понад 1450 зразків керну. Стратиграфічне зіставлення та побудова структурних карт дали змогу відобразити архітектоніку покладів і межі нафтонасичених товщ. Ресурси визначались за детерміністичними методами з урахуванням ефективної товщини, пористості, насичення та площі пастки.***

**Результати.** ***У межах Продуктивної серії виділено 26 нафтонасичених об'єктів у восьми стратиграфічних пачках (світах), зокрема в горизонтах Gala, Pre-Kirmaki, Kirmaki, Post-Kirmaki тощо. Пористість порід варіює в межах 12–28 %, проникність – від 0.001 до 3.92 мкм². Найбільш продуктивними є горизонти GS-1, GS-2 (свита Gala) та PKS-2a, PKS-2 (свита Pre-Kirmaki), особливо в блоках II, III, IV і V. У блоці I колекторські властивості слабко розвинені. Розподіл вуглеводнів зумовлений поєднанням тектонічних пасток, літологічних ущільнень та фаціальних змін.***

**Висновки.** ***Родовище Нафтові Камені характеризується складною стратиграфічною будовою та значною тектонічною дислокованістю, що зумовлює неоднорідність колекторів як по площі, так і по розрізу. Інтеграція даних буріння, каротажу та петрофізики дала змогу визначити просторові межі продуктивних інтервалів і сформулювати критерії їх ефективності.***

**Ключові слова:** ***Нафтове родовище, Продуктивна серія, пористість, проникність, стратиграфія, тектоніка, шельфова зона, геофізичний аналіз.***

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

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

UDK 553.982
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.10

**Gultar NASIBOVA, Assoc. Prof.**
**ORCID ID: 0000-0001-9456-1391**
**e-mail: gultarnasibova18@gmail.com**
**Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan**

**Sevil ZEYNALOVA, Lecturer**
**ORCID ID:0000-0001-7300-4545**
**e-mail: Sevil.zeynalova69@asoiu.edu.az**
**Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan**

# MODELING OF DEVELOPMENT OPTIMIZATION IN BALAKHANI-SABUNCHU-RAMANA FIELD (V HORIZON)

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. Георгієм ЛІСНИМ)*

**Background.** *This paper presents the principals of application relevance methods for modeling and optimizing the development process, such as Shewhart control charts. This method provides a guide to a detailed development process that addresses various issues that often arise when implementing waterflooding in both offshore and onshore oil and gas fields, in extraction of fluids from reservoir, challenges in well drilling, in oil recovery etc. Using the Shewhart control charts method, it was possible to obtain an adequate answer to the problem (adjustment of the development process) when studying the issues of optimizing the dynamics of oil production from the field. At the same time, this method is useful both for the analysis of all dynamic series and for individual segments (stages).*

*The purpose of constructing control charts is to identify the points at which the process leaves a steady state in order to subsequently determine the causes of the deviations that have arisen and eliminate them. The purpose of constructing Shewhart control charts is to determine the boundaries of the system variability of the process and to predict the behavior of the process in the near future based on past process data.*

**Methods.** *Development curves have been constructed using geological and field data. This graph allows determining the optimal development regime, recalculating oil and gas reserves, and fully reflecting the effective extraction of hydrocarbons from the field.*

**Results.** *Analyzing the relationship among development curves, pressure recovery, oil and gas production growth rates for various development periods adjustment is possible.*

**Conclusions.** *As a result of the research conducted using the Shewhart control charts dynamic model, it was possible to control and regulate the development processes of the V horizon of the Balakhany-Sabunchu-Ramana field, which is an exploitation object, as well as to determine the optimality levels of these processes and the effectiveness of using appropriate methods to increase the oil recovery factor.*

*This method proved effective in increasing production, can effectively enhance the production performance during the optimization process. This is crucial for implementing refined management of individual horizons, determining the exit beyond of development regulation limits.*

**Keywords:** *development curves, Shewhart control charts, deviations, regulation, optimal development, exploitation object.*

## Background

The correct selection of technologies and methods is an important factor in significantly improving the efficiency of the development and operation of gas and oil fields (Mukhametshin, 2022). The closely interconnected links of the production and consumption chain require the use of integrated systems and programs that can increase oil production and help reduce the total cost of ownership.

The solution of the latest technological issues also allows improving the control and analysis of various processes in gas and oil fields. One of the most important aspects in the process of development and adjustment of fields is the selection of control systems and appropriate methods to increase the oil recovery factor (Chupin, & Moroz, 2020; Urazgaliyeva et al., 2023; Yang, Kim, & Choe, 2017; Zhang et al., 2023).

***Material.*** Geological and field data of SOCAR were used to investigate and analyze the development process of horizon V of the Balakhany-Sabunchu-Ramana field. Surface and Excel programs were used to plot the graphs attached to the work.

***Lithological-stratigraphic and tectonic features of the development object.*** The Balakhany-Sabunchu-Ramana field is located 12 km northeast of Baku. The area of the field resembles a latitudinal lowland. In the west of the lowland, the Bogh-Bogha mud volcano is located in the Balakhani area. The Boyukshor and Ramana lakes are stretched in latitudinal direction, and are located to the south of the Balakhany-Sabunchu-Ramana field (Salmanov et al., 2023).

The Productive series (PS), Aghjagil and Absheron deposits have been exposed in the geological section of the field. In the Bogh-Bogha mud volcano zone located in the relatively elevated part of the fold and to the west of it, deposits of the Fasila and partly Post-Kirmaki Clayey (PKC) and Pre-Kirmaki (PK) suites of the PS have been discovered. Towards the Ramana area, most younger deposits emerge to the Earth's surface.

The PS deposits consist of alternating sand, sandstone and clay. The section of PK suite is sandy. At the intersection of the PS, the Surakhany, Sabunchu, Balakhany, Fasila, PKC, Post-Kirmaki Sandy (PKS), PK suite are separated. The horizon V of the Balakhany–Sabunchu–Ramana field is separated at the intersection of the Balakhany suite (Fig. 1).

The field is associated with a large brachyanticlinal fold extending in the latitudinal direction. The fold has a steep southern (40–70°) and inclined northern (10–15°) limb and a wide crest (Fig. 2, 3).

The structure is complicated by numerous longitudinal faults. Transverse faults have not very large displacement amplitudes (10–40 m) and they decrease with increasing depth.

The industrial oil content of the field is associated with sediment complexes from the Absheron stage to the PK suite of the PS. More than 30 oil-bearing layers are separated at the intersection of these suites (Fig. 3).

© Nasibova Gultar, Zeynalova Sevil, 2025

ISSN 1728-3817

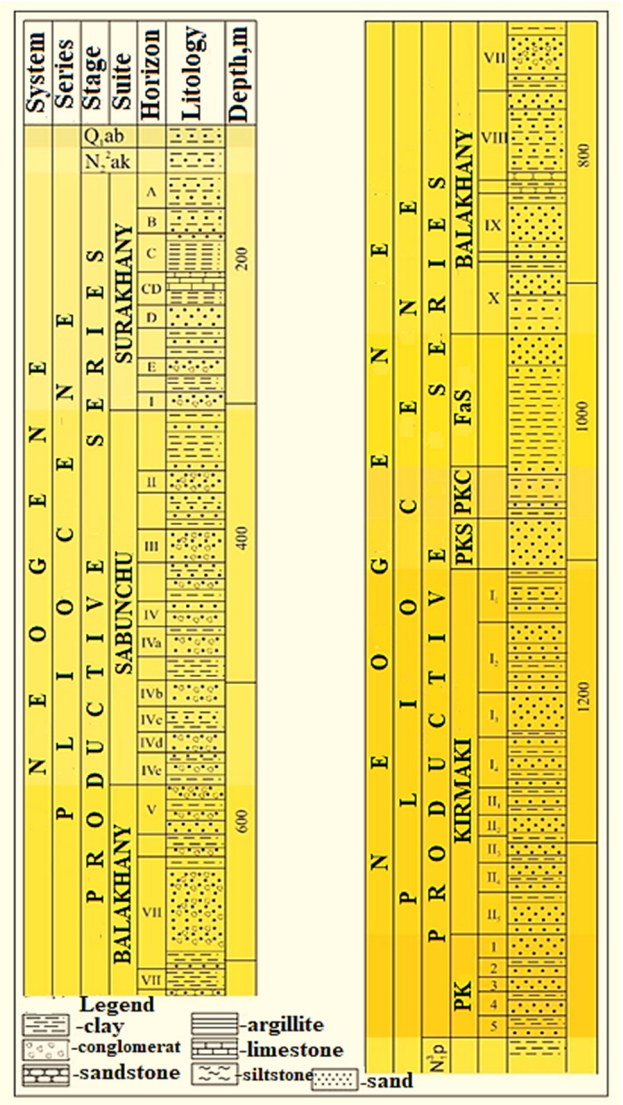



Fig. 1. Balakhany–Sabunchu–Ramana deposit. Generalized geological section

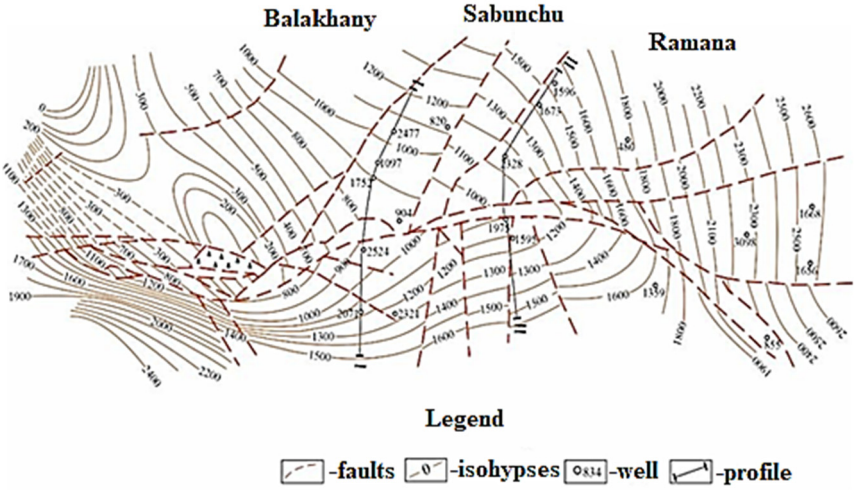



Fig. 2. Balakhany–Sabunchu–Ramana field. Structural map by the top of the KS of the PS

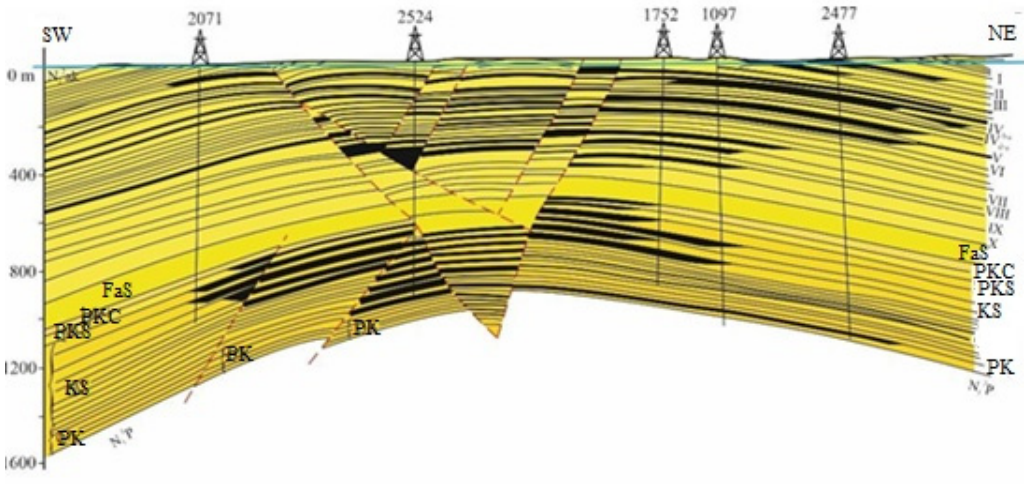



**Fig. 3. Balakhany–Sabunchu–Ramana field. Geological profile**

The oil deposit in the upper series of the PS covers a large area and the production wells are characterized by high productivity. In the intersection of the upper series, 10 main and a number of intermediate sandstone layers are distinguished. The depth of the productive layers is not very deep, from 140 m to 460 m. The open porosity of the reservoirs along the intersection is 24–27 %, and the permeability is $700\times10^{-15}$ m$^2$.

The horizon V, which is the object of research, is mainly associated with a tectonic screened trap. The intersection of the horizon is characterized by 23 % clay content and 81 % sandiness. Lithologically, the reservoir rocks are composed of sand and sandstone. The porosity of the rocks is 26 %, the permeability is $364\times10^{-3}$ μm$^2$, and the carbonate content is 13 %. The viscosity of the oil is 8 mPa x s; the current oil recovery factor is 0.73 %. The current oil-bearing area of the development object is 1090 m$^2$, the average depth of the reservoir is 390 m, and the effective thickness is 34 m.

**Methods**

In order to analyze (Aliev, 1983; Salmanov et al., 2023) and predict the development of horizon V of the Balakhany–Sabunchu–Ramana field, development curves were constructed using geological-field data (Fig. 4). This graph fully reflects the determination of the optimal development regime, recalculation of oil and gas reserves, and effective extraction of hydrocarbons from the deposits. The graph reflects the III (1931–1975) and IV (starting from 1975) stages of the development of horizon V. Thus, according to the analysis, the volume of oil extracted from the horizon gradually decreased, from 357.4 thousand tons (1931) to 173 thousand tons (1945). In 1945–1958, there was a certain increase in oil production. Production varies between 188–211 thousand tons. The increase in production in these years was achieved by increasing the number of production wells and increasing the volume of water injected into the horizon. The decline is also observed in gas production. Gas has been produced from the horizon since 1965, and a decline in production has been observed since that year. Between 1965 and 2015, the volume of gas produced decreased from 6.6 m$^3$/t to 0.11 m$^3$/t.

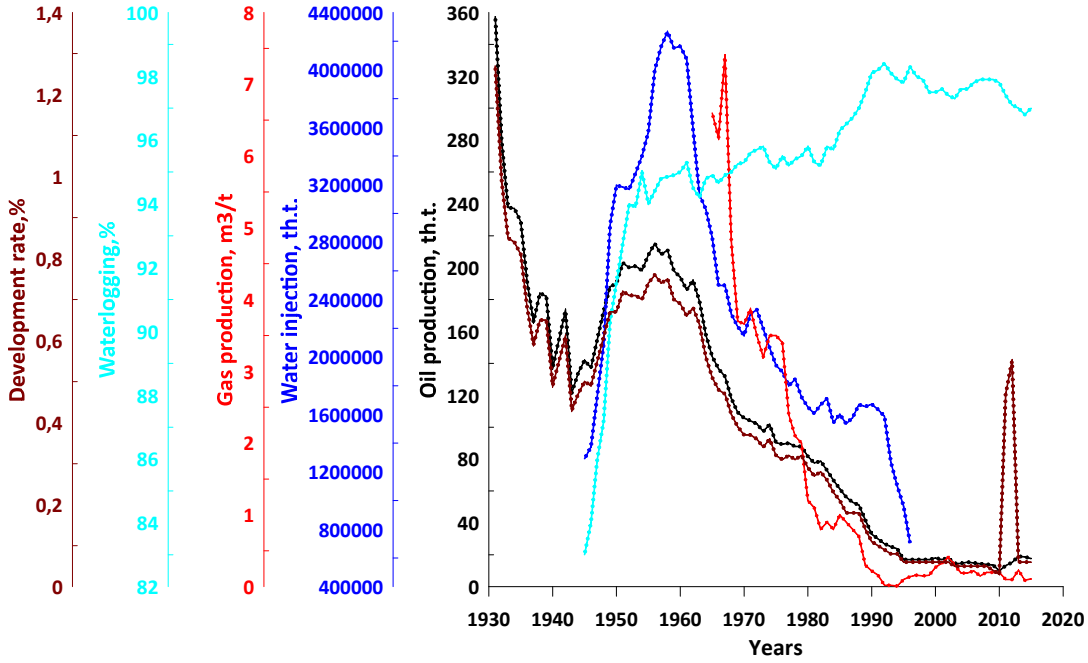



**Fig. 4. Development curves of the horizon V of the Balakhany–Sabunchu–Ramana field compiled based on geological-field data**

ISSN 1728-3817

As can be seen from the graph, water injection into the horizon began in 1945. The goal is to overcome the observed declines in production and optimize the level of exploitation. Initially, 1290638 $m^3$/t of water was injected into the horizon, which slightly increased production. However, as the amount of injected water increased, the level of waterlogging in the formation increased. The maximum amount of water (4265623 $m^3$/t) was injected into the horizon in 1958, as a result of which 211 thousand tons of oil were extracted from the formation. The water injection process was gradually reduced (706411 $m^3$/t) and finally stopped. Because the waterlogging in the horizon increased, it increased by 98.3 %. The rate of development of the horizon also decreased in turn. Thus, since 1931, the dynamics of development began to decrease. It decreased from 1.27 % to 0.06 %. The development rate on the horizon increased slightly only in 2012, reaching 0.55 %. Then it sharply decreased to 0.06 % (see Fig. 4).

**Results**

Crude oil adjustment reflects the combined uncertainty around each of the crude oil data elements and crude oil supply and its disposition. The crude oil balance relationship, which are developed independently, should balance perfectly. In practice, this is rarely the case, because timing differences or other factors that contribute to survey responses may not precisely reflect actual crude oil extraction, storage, and refining activity for the year (Merriam, 2015).

So, engineers need to continuously adjust strategies to maximize oil recovery during development. Then strategy adjustment requires a lot of cost, so it is necessary to select the optimal strategy through production forecasting (Wang et al., 2022; Wang et al., 2023).

In this paper, Shewart control charts, used in the management of oil and gas field development processes, are a visual tool, a graph showing the change in process parameters over time to implement statistical control over the stability of the process. Timely detection of instability in the development allows to obtain a controlled process, without which no improvement is possible in principle. Control charts were first established in 1924 by Walter Shewhart to reduce process variability by eliminating deviations arising in operation from non-systemic causes.

The purpose of constructing control charts is to identify the points at which the process leaves a steady state in order to subsequently determine the causes of the deviation and eliminate them. The purpose of constructing Shewhart control charts is to determine the boundaries of the system variability of the process, and to predict the behavior of the process in the near future based on past process data.

For this reason, Shewhart control charts were constructed in order to optimize and regulate the development of the horizon V. Control maps have been drawn up for optimal regulation of oil and gas production (Fig. 5a, 5b).

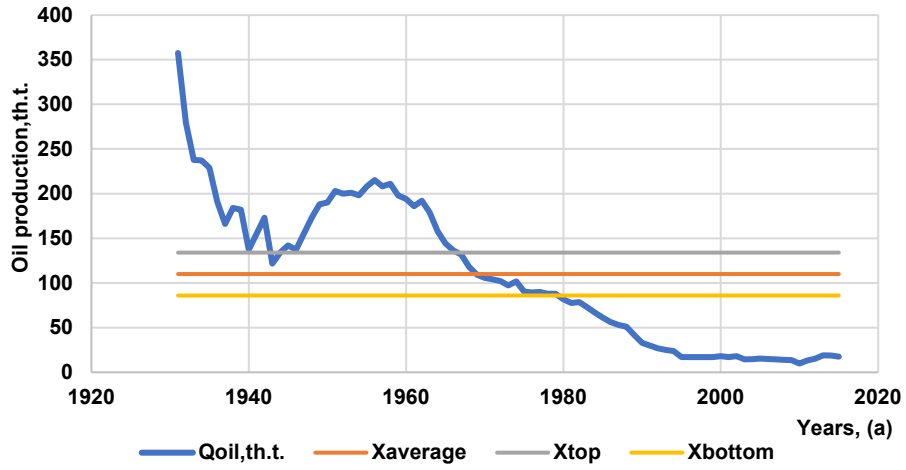



**Fig. 5a. Control chart of oil production (horizon V)**

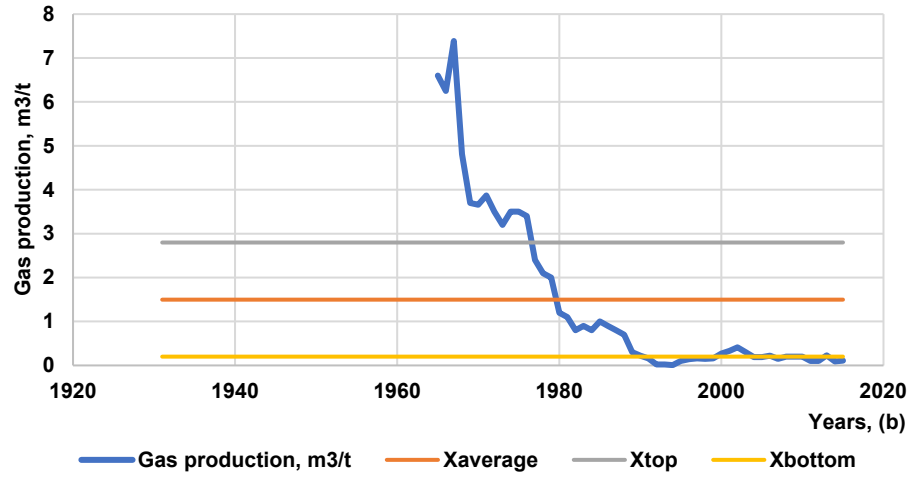



**Fig. 5b. Control chart of gas production (horizon V)**

The top, average and bottom limits for the horizon have been determined: for oil- $X_{average}$=110; $X_{top}$=134; $X_{bottom}$=86; for gas- $X_{average}$=1.5; $X_{top}$=2.8; $X_{bottom}$=0.2. As can be seen from the chart, the adjustment limits established to regulate both oil and gas production are symmetrical with the average limit, but deviations from the top and bottom limits are observed in the development process. It should be noted that from 1971 to 2015, an intensive decrease in oil production was observed. After 2015, the curve deviated from the bottom adjustment limit and fell to 17.6 thousand tons. Gas production on the horizon began in 1965, and there was a gradual decrease in production in that year. The initial production is 6.6 $m^3$/t. Since 1965, production has decreased from 6.6 $m^3$/t to 0.11 $m^3$/t. The maximum production occurred in 1967, which was 7.39 $m^3$/t. In order to study the reasons characterizing this process, similar charts were compiled for the main production indicators: the number of production wells (Fig. 5c), the volume of water injected into the horizon (Fig. 5d); waterlogging (Fig. 5e) and the development rate of production (Fig. 5f).

The upper, middle and lower limits for well regulation have been determined: $X_{average}$=261.7; $X_{top}$=316; $X_{bottom}$=207 (Fig. 5c).

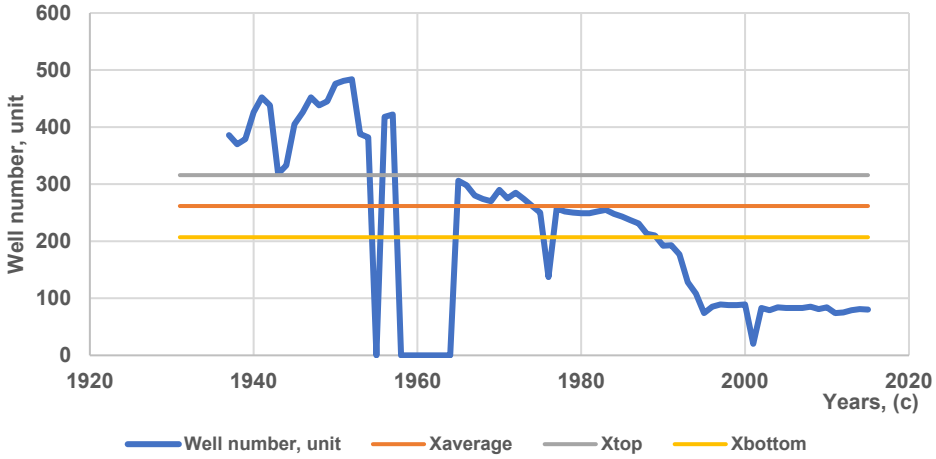



**Fig. 5c. Control chart of well number (horizon V)**

The control chart of wells drilled along the horizon shows that the top and bottom adjustment limits are relatively symmetrical at the average limit. Based on the analysis, it was determined that in order to maintain the development process at an optimal level, it is advisable to have a maximum of 316 wells and a minimum of 207 wells. However, the decrease in the number of wells drilled since 1990 has had a negative impact on both oil and gas exploitation and development dynamics.

In reservoir development, liquid production rate and water injection rate change according to the human-made policy, leading to an unnatural fluctuation of development process (Wang et al., 2022). To make analysis more accurate, we analyzed the factors of effects on oil production rate. We notice that the oil rate is seriously affected by injected water from the injection wells (Fig. 5d).

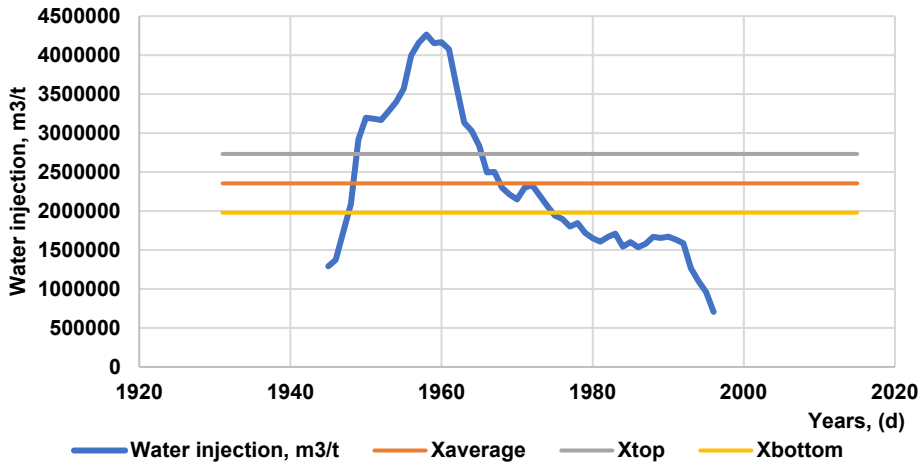



**Fig. 5d. Control chart of water injection (horizon V)**

There is injection of water into formations in order to increase the permeability of formations, coverage of formations due to waterlogging, regulation of the process of displacement of oil to the bottoms of production wells. However, on the other hand, there are also negative manifestations during water injection. This is the flooding of layers earlier. Because of this, water injection was stopped in our target facility in 1996.

The nature of the waterlogging of the extracted production is influenced by many factors related, on the one

hand, to the geological structure and collector properties of the layer, the physical and chemical properties of oil and the displacing liquid, and on the other hand, to the applied well placement system, the technology of their construction, and operating modes. In the conditions of increasing depressions, a large number of wells are flooded due to the breakthrough of water through separate high-permeable areas of the developed object, the violation of the tightness of the underground space, and also due to the pulling of the cones of the bottom water. In addition, many oil fields have hydro-oil zones and wells located in these zones begin to produce watered-down products from the first days of operation. Premature flooding of wells reduces the final oil recovery and causes large non-productive costs for production, transportation of associated water and for combating corrosion of industrial equipment (Bagirov, 2011; Bazhenova et al., 2004, 2012).

The considered horizon, which has been under development for more than 74 years, has large reserves of oil and consists of one productive layer with high-viscosity oil of about 8 mPas. Only 16 % of recoverable oil reserves were selected during the development period. Waterlogging of the product is 97 % (Fig. 5e).

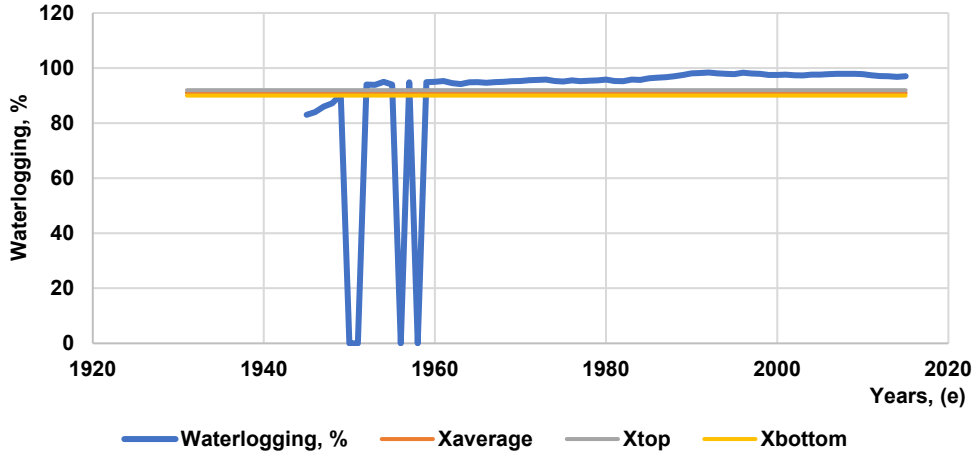



**Fig. 5e. Control chart of waterlogging (horizon V)**

As can be seen from the chart, the waterlogging level of the horizon is above the adjustment limit; however, there is a danger of losing significant reserves of oil, which were in the "bypassed oil", due to the influence of capillary forces and anisotropic properties of the reservoir.

Therefore, it is necessary to find solutions as soon as possible, to test new technologies at the horizon and to apply them on an industrial scale, in order to achieve the final approved ORF and high economic efficiency of the enterprise. An additional reason for the early waterlogging of the products of production wells is a violation of the integrity of annular space. Maintenance of high rates of oil production is achieved by the introduction of new oil production from drilling wells, while the majority of wells that have been watered down are out of operation, and have not exhausted their potential. Conducting regular measures to control development allows timely identification of the causes of backflows (Chupin, & Moroz, 2020; Kuangaliev, Doskaziyeva, & Mardanov, 2019; Law of the Republic of Kazakhstan, 2010; Lysenko, 2003; Maharramov, Karimov, & Sharifov, 2022; Maisel, 2020; Saptarini, & Nainggolan, 2022; Schiozer et al., 2019).

During the development of reservoirs, the most different values of the maximum rate of oil production are reached. The maximum extraction rate is inversely proportional to the time of its achievement and depends on the type of law of entering wells, that is, from the general organization of oil production, the slower the wells are entered, the lower the rate of production is (Boyce et al., 2011; Kuvanyshev, & Kuvanysheva, 2010).

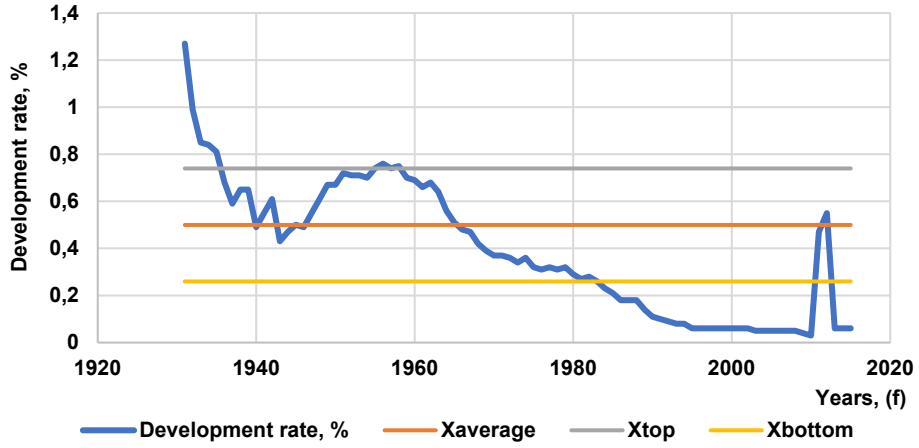



**Fig. 5f. Control chart of development rate (horizon V)**

As is known, the studied horizon is in the last stage of exploitation. According to the mining data, the development rate since the beginning of development was 1.27 %. On the eve of the process, a decrease in the development rate is observed starting from 1931. The rate decreased from 1.27 % (1931) to 0.06 % (2015). As can be seen from the control chart, this indicator is marked much below the adjustment limit (with the top limit being 0.74 % and the bottom limit being 0.26 %).

**Discussion and conclusion**

A comprehensive analysis of the Shewhart control charts constructed on the development indicators of the horizon V allows us to identify the reasons for the change in annual oil and gas production throughout the entire development period.

• At the initial stage, a large number of production wells were put into operation: from 1931 to 1942, their number increased from 386 to 438, although the optimal control zone for this indicator should be between 316 and 207 units (Fig. 5c).

• The amount of water injected from 1951 to 1959, in order to maintain the development process at an optimal level. It was advisable to inject a maximum of 2732743 $m^3$/t, an average of 2356180 $m^3$/t, and a minimum of 1979617 $m^3$/t of water, the amount of water injected was increased from 31960000 $m^3$/t to 4152060 $m^3$/t (Fig. 5d). During the development period, the volume of water injected in 1949–1966 was outside the top limit of adjustment. Since 1976, it has been outside the bottom limit. In this case, a decrease in the number of water-injecting wells is noted. Despite the decrease in the amount of water injected into the horizon, it had a significant impact on both the oil production process and the rapid waterlogging of the horizon. In this regard, the process of water injection into the horizon was stopped in 1996.

• The waterlogging of the horizon was below the bottom optimal adjustment limit in 1949, 1953, 1956, 1958, 1960 and amounted to 90 %. From 1960 to 2015 it was outside the top limit, increasing from 90 % to 97 % (Fig. 5d).

• From 1931 to 1936 the rate of development was outside the top limit of adjustment (Fig. 5e). While the top 0.75%, the average 0.5%, and the bottom 0.29 % were required, it was noted outside the bottom adjustment limit in 1984, 2011, 2013–2015.

Thus, as can be seen from the above figures, it was possible to obtain an adequate answer to the problem posed when studying the issues of optimizing the dynamics of oil production from the field (adjustment of the development process) using the Shewhart control chart method. At the same time, this method is useful both for the analysis of all dynamic series and for individual segments (stages). As a result of the research conducted using the Shewhart control chart dynamic model, it was possible to control and regulate the development processes of the horizon V of the Balakhany–Sabunchu–Ramana field, which is an exploitation object, as well as to determine the optimality levels of these processes and to determine the effectiveness of the use of appropriate methods for increasing the oil recovery factor.

Thus, knowing that the viscosity of the horizon's oil is 8 mPaxs., its permeability is 364×$10^{-3}$ μ$km^2$, the average depth of the reservoir is 390 m, and that 16% of the geological reserve is used, it was determined that the use of SAM, alkaline and micellar substances injection methods into the layers is effective in increasing the oil recovery factor (according to B.A. Bagirov's "tree" method) (Bagirov, 2011; Ivanova, Cholovsky, & Bragin, 2000; Karimov, Sharifov, & Zeynalova, 2023).

**Sources of funding.** This study did not receive any grant from a funding institution in the public, commercial, or non-commercial sectors.

**References**

Aliev, A. (1983). *Optimization of development indicators for multilayer gas fields* [Candidate dissertation abstract, Higher Attestation Commission of the USSR] [in Russian]. [Алиев, А. (1983). *Оптимизация показателей разработки многопластовых газовых месторождений* [Автореф. дис. канд. техн. наук, ВАК СССР]].

Bagirov, B. A. (2011). *Oil and gas field geology*. Baku.

Bazhenova, O. K., Burlin, Yu. K., Sokolov, B. A., & Khain, V. E. (2004). *Geology and geochemistry of oil and gas* (2nd ed.). Moscow State University Press [in Russian]. [Баженова, О. К., Бурлин, Ю. К., Соколов, Б. А., & Хаин, В. Е. (2004). *Геология и геохимия нефти и газа* (2-е изд.). Издательство Московского государственного университета].

Bazhenova, O. K., Burlin, Yu. K., Sokolov, B. A., & Khain, V. E. (2012). *Geology and geochemistry of oil and gas* (3rd ed.). Moscow State University Press [in Russian]. [Баженова, О. К., Бурлин, Ю. К., Соколов, Б. А., & Хаин, В. Е. (2012). *Геология и геохимия нефти и газа* (3-е изд.). Издательство Московского государственного университета].

Boyce, J. R., & Nøstbakken, L. (2011). Exploration and development of U.S. oil and gas fields, 1955–2002. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 35(6), 891–908.

Chupin, V. R., & Moroz, M. V. (2020). Comprehensive optimization of district systems water supply and sewerage taking into account different ways of transporting water and effluents. *E3S Web of Conferences*, 219, 03005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021903005

Eyvazov, J. (2018). *Design and development of oil and gas fields* (Graduate program).

Ivanova, M. M., Cholovsky, I. P., & Bragin, Yu. I. (2000). *Oil and gas field geology* (Textbook for universities). Nedra-Business Center [in Russian]. [Иванова, М. М., Чоловский, И. П., & Брагин, Ю. И. (2000). *Нефтегазопромысловая геология*. Недра-Бизнесцентр].

Karimov, V. M., Sharifov, J. J., & Zeynalova, S. A. (2023). Intensification of oil production in long-term developed offshore fields. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(2), 276–282. https://doi.org/10.15421/112326

Kuangaliev, Z. A., Doskaziyeva, G. Sh., & Mardanov, A. S. (2019). Solving the problems of water cut in production wells of oil fields. *The Scientific Heritage*, 40, 30–34 [in Russian]. [Куангалиев, З. А., Досказиева, Г. Ш., & Марданов, А. С. (2019). Решение проблем обводненности продукции добывающих скважин нефтяных месторождений. *The Scientific heritage*, 40, 30–34].

Kuvanyshev, U. P., & Kuvanysheva, O. U. (2010). About the maximum oil production rate. *Well Drilling and Field Development, Oil and Gas*, 5, 39–45 [in Russian]. [Куванышев, У. П., & Куванышева, О. У. (2010). О максимальном темпе отбора нефти. *Бурение и разработка месторождений, Нефть и газ*, 5, 39–45].

*Law of the Republic of Kazakhstan No. 291-IV: On subsoil and subsoil use*. (2010). Kazakhstanskaya Pravda, *159-160*(26220-26221) [in Russian]. [*Закон Республики Казахстан № 291-IV: О недрах и недропользовании*. (2010). Казахстанская Правда, *159-160*(26220-26221)].

Lysenko, V. D. (2003). *Development of oil fields*. Nedra [in Russian]. [Лысенко, В. Д. (2003). *Разработка нефтяных месторождений*. Недра].

Maisel, D. I. (2020). Management of development and conservation of oil and gas fields. *E3S Web of Conferences*, 219, 02002.

Maharramov, F. F., Karimov, V. M., & Sharifov, J. J. (2022). On the assessment of the diversity of coefficients of oil recovery from developed objects. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(3), 513–520. https://doi.org/10.15421/112247

Merriam, R. (2015). Crude oil adjustment balances independently developed supply and disposition components.

Mukhametshin, V. Sh. (2022). Oil recovery factor express evaluation during carbonate reservoirs development in natural regimes. *SOCAR Proceedings, Reservoir and Petroleum Engineering Journal Home Page*, 1, 27–36. https://doi.org/10.5510/OGP2022SI100642

Salmanov, A. M., Maharramov, B. I., Qaragezov, E. Sh., & Kerimov, N. S. (2023). *Geology of oil-gas fields and development stages of Azerbaijan area of Caspian Sea* (Referencebook). MSV publishing house.

Saptarini, D. A., & Nainggolan, Y. A. (2022). Risk Management in Oil and Gas Field Development Project with Marginal Resources: A Case in Mature Field in East Kalimantan. *European Journal of Business and Management Research*, 7(5), 45–53. https://doi.org/10.24018/ejbmr.2022.7.5.1629

Schiozer, D. J., dos Santos, A. A. S., Santos, S. M. de G., & von Hohendorff Filho, J. C. (2019). Model-based decision analysis applied to petroleum field development and management. *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies Nouvelles*, 74, 46. https://doi.org/10.2516/ogst/2019019

Urazgaliyeva, M. K., Orazbayeva, K. N., Shayakhmetova, Zh. B., Orazbayev, B. B., & Bekbauliyeva, A. A. (2023). Optimization and management of oil fields development processes based on modeling and system approach. *Neft i gaz*, 2(134), 139–149 [In Russian]. [Уразгалиева, М. К., Оразбаева, К. Н., Шаяхметова, Ж. Б., Оразбаев, Б. Б., & Бекбаулиева, А. А. (2023). Оптимизация и управление процессами разработки нефтяных месторождений на основе моделирования и системного подхода. *Разработка. Нефть и газ*, 2(134), 139–149]. https://doi.org/10.37878/2708-0080/2023-2.10

Zhang, R., Guowei Zhang, G., Li, Q., Li, J., & Zhang, N. (2023). Optimization algorithm and genetic coding method for an oilfield development plan considering production constraints. *Processes*, 11(12), 3386. https://doi.org/10.3390/pr11123386

Wang, H., Zhang, K., Deng, X., Cui, S., Ma, X., Wang, Z., Qi, J., Wang, J., Yao, C., Zhang, L., Yang, Y., & Zhan, H. (2022). Highly accurate oil production forecasting under adjustable policy by a physical approximation network. *Energy Reports*, 8, 14396–14415. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.406

Wang, Z., Fan, Z., Chen, X., Fan, Z., Wei, Q., Wang, X., Yue, W., Liu, B., & Wu, Y. (2023). Global oil and gas development in 2022. *Petroleum Exploration and Development*, 50(5), 1167–1186. https://doi.org/10.1016/S1876-3804(23)60456-2

Yang, H., Kim, J., & Choe, J. (2017). Field development optimization in mature oil reservoirs using a hybrid algorithm. *Petroleum Science and Engineering*, 156, 41–50. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2017.05.009.

**Отримано редакцією журналу / Received: 27.08.25**
**Прорецензовано / Revised: 16.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Гультар НАСІБОВА, доц.**
**ORCID ID: 0000-0001-9456-1391**
**e-mail: gultarnasibova18@gmail.com**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

**Севіль ЗЕЙНАЛОВА, викл.**
**ORCID ID: 0000-0001-7300-4545**
**e-mail: Sevil.zeynalova69@asoiu.edu.az**
**Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан**

## МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗРОБКИ НА РОДОВИЩІ БАЛАХАНИ-САБУНЧУ-РАМАНА (V ГОРИЗОНТ)

***В с т у п .*** *У статті представлено принципи застосування методів релевантності для моделювання та оптимізації процесу розробки, таких як контрольні карти Шухарта. Цей метод надає керівництво для детального процесу розробки, який враховує різні питання, що часто виникають під час впровадження заводнення як на морських, так і наземних нафтогазових родовищах, під час видобутку рідин із пласта, проблеми під час буріння свердловин, під час видобутку нафти тощо. Використовуючи метод контрольних карт Шухарта, вдалося отримати адекватну відповідь на проблему (коригування процесу розробки) при вивченні питань оптимізації динаміки видобутку нафти з родовища. Водночас цей метод корисний як для аналізу всіх динамічних рядів, так і для окремих сегментів (етапів).*

*Метою побудови контрольних карт є визначення точок, у яких процес виходить зі стаціонарного стану, щоб згодом визначити причини виниклих відхилень та усунути їх. Метою побудови контрольних карт Шухарта є визначення меж системної мінливості процесу та прогнозування поведінки процесу в найближчому майбутньому на основі даних минулого процесу.*

***М е т о д и .*** *Криві розробки було побудовано з використанням геологічних і промислових даних. Цей графік дає змогу визначити оптимальний режим розробки, перерахувати запаси нафти і газу та повно відобразити ефективний видобуток вуглеводнів з родовища.*

***Р е з у л ь т а т и .*** *Аналізуючи взаємозв'язок між кривими розробки, відновленням тиску, темпами зростання видобутку нафти і газу для різних періодів розробки, можливе коригування.*

***В и с н о в к и .*** *В результаті дослідження, проведеного з використанням динамічної моделі контрольних карт Шухарта, стало можливим контролювати та регулювати процеси розробки V горизонту родовища Балахани–Сабунчу–Рамана, яке є об'єктом експлуатації, а також визначати рівні оптимальності цих процесів та ефективність використання відповідних методів підвищення коефіцієнта вилучення нафти.*

*Цей метод виявився ефективним у збільшенні видобутку, може ефективно підвищити виробничі показники під час процесу оптимізації, що має вирішальне значення для впровадження уточненого управління окремими горизонтами, визначення виходу за межі регулювання розробки.*

***К л ю ч о в і  с л о в а :*** *криві розробки, контрольні карти Шухарта, відхилення, регулювання, оптимальна розробка, об'єкт експлуатації.*

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

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

## ГЕОІНФОРМАТИКА

УДК 332.3:711.2:504.4
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.11

Антон ТРЕТЯК[1], д-р екон. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-1154-4797
e-mail: tretyak2@ukr.net

Валентина ТРЕТЯК[2], д-р екон. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-6779-1941
e-mail: valentyna.tretiak@snau.edu.ua

Наталія КАПІНОС[2], канд. екон. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-9354-5311
e-mail: nataliia.kapinos@snau.edu.ua

Вікторія СТРЕЛЬНИК[2], канд. юрид. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-1068-8617
e-mail: viktoriia.strelnyk@snau.edu.ua

Наталія ПЕТРОВА[2], д-р філософії, доц.
ORCID ID: 0000-0003-4242-2212
e-mail: nataliia.petrova@snau.edu.ua

[1]Білоцерківський національний аграрний університет, Біла Церква, Україна
[2]Сумський національний аграрний університет, Суми, Україна

# ФОРМУВАННЯ ПРИРОДНО-ЕКОЛОГІЧНОГО КАРКАСУ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ В КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТІЙКОСТІ: МЕТОДИЧНІ ТА МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром техн. наук, проф. Віталієм ЗАЦЕРКОВНИМ)*

**В с т у п .** ***Оцінка співвідношення в межах адміністративних утворень різних категорій земель чи типів землекористування в контексті природоохоронного значення за критерієм ресурсоспоживаюче (ресурсоексплуатуюче), середовищеохоронне та резервне землекористування дає змогу виробити рекомендації щодо трансформації структури землекористування для переведення земель у категорію елементів, які охороняються, і буферних зон природно-екологічного каркасу системи землекористування.***

**М е т о д и .** ***Застосовано методику екологічної стабільності, що дає змогу проведення оцінки перспектив формування єдиного природно-екологічного каркасу Сумської області України.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***За підсумками проведеної оцінки передумови формування природно-екологічного каркасу системи землекористування в Сумській області України за критерієм ресурсоспоживаюче (ресурсоексплуатуюче), середовищеохоронне та резервне землекористування природоохоронного значення можуть бути визначені як сприятливі. Серйозним стримуючим чинником формування екологічного каркасу є включення до системи землекористування екологічної мережі сільськогосподарських угідь. У зв'язку із цим створення природно-екологічного каркасу системи землекористування Сумської області України та інших регіонів нині більшою мірою залежить від розвитку і вдосконалення правових механізмів.***

**В и с н о в к и .** ***У земельному та природоохоронному законодавстві має бути закріплено поняття "екологічний каркас", "елемент екологічного каркаса", "функціональне використання земель", "трансформація функціонального використання земель", що дасть змогу визначити відповідні режими землекористування, а також знизити антропогенну дію на територію індивідуально для кожного елемента каркасу. Збільшення частки земель, що виконують середовищеформуючі функції, має супроводжуватися диверсифікацією та інтенсифікацією землекористування на територіях поза природно-екологічним каркасом.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***природно-екологічний каркас, землекористування, екологічна мережа, екологічна стабільність.***

## Вступ

Створення природно-екологічного каркасу регіону традиційно розглядається як фактор поліпшення екологічної обстановки й оптимізації землекористування. Під впливом природних і антропогенних процесів, спричинених поділом наявних земельних та інших природних ресурсів з урахуванням територіальних особливостей у просторі і часі, формується спільність господарського життя, що забезпечує цілісність і певну ізольованість території. Структура землекористування, що склалася до теперішнього часу, відіграє ключову роль у формуванні екологічної ситуації в Сумській області України. Для регіону характерна низка екологічних проблем, звичайних для староосвоєної території та зумовлених високим рівнем антропогенного навантаження: деградація ґрунтового покриву (Masiuk, Dziuman, & Matsiuk, 2024), забруднення водних об'єктів, зменшення видового розмаїття та місць існування видів рослинного і тваринного світу тощо. Під основною концепцією деградації земель розуміється втрата фактичної або потенційної продуктивності та корисності землі, а також зниження її якості. Вона передбачає зменшення властивості землі виробляти економічні блага та виконувати функції, що стримують навколишнє середовище (Cojocaru, & Abramov, 2023). У сучасній структурі землекористування Сумської області України переважають землі сільськогосподарського призначення, що займають близько 71,2 % площі земельного фонду (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023), з них власне рілля становить 51,5 % (1,2 млн га), що свідчить про високий рівень сільськогосподарського освоєння та надмірну розораність її території. Сіножаті та пасовища займають

© Третяк Антон, Третяк Валентина, Капінос Наталія, Стрельник Вікторія, Петрова Наталія, 2025

ISSN 1728-3817

лише 18,8 % (447,2 тис. га), а частка багаторічних насаджень становить усього 1 % (24,4 тис. га).

Структуру земельного фонду регіону Сумської області України наведено на (рис. 1).

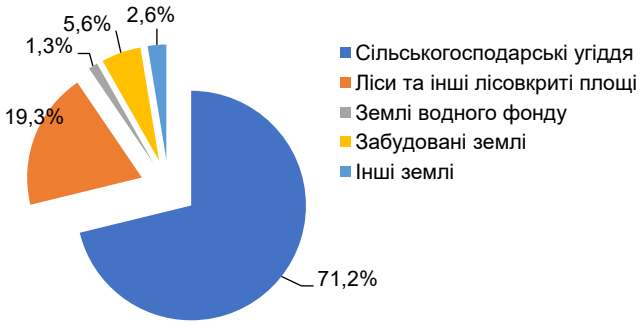



**Рис. 1. Структура земельного фонду Сумської області станом на 2023 рік (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023)**

Надмірне розширення площі ріллі за рахунок схилових земель призвело до порушення екологічно збалансованого співвідношення земельних угідь: ріллі, природних кормових угідь, лісів і водойм, що негативно позначилося на стійкості агроландшафтів та зумовило значну техногенну ураженість природних комплексів та формування екологічної ситуації.

Агрохімічна оцінка ґрунтів Сумської області України є однією з найвищих в Україні та становить в середньому 51 бал (коливається в межах 42–58 балів). Родючість ґрунтів області за вказаною шкалою порівняно з іншими регіонами України вища за середню. Сумську область віднесено до регіонів, які мають середню частку еродованих ґрунтів (20,8 %). На території Сумської області України виявлено 739,8 га деградованих земель та 915,1 га малопродуктивних земель.

Отже, на середовищеформуючі види землекористування (*мережа природних територій, що особливо охороняються, а також землі лісового та водного фондів*) припадає 20,6 % території області. Незважаючи на те, що до складу мережі природно-заповідного фонду входить 19 об'єктів загальнодержавного значення площею 50456 га (28,1 %) та 300 об'єктів місцевого значення площею 128770 га (71,9 %), їх регулюючий вплив на екологічну обстановку невеликий (табл. 1).

***Таблиця 1***

**Структура природно-заповідного фонду Сумської області станом на 01.01.2024***

| Об'єкти природно-заповідного фонду | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Загальнодержавного значення | | | Місцевого значення | | Всього | |
| **Найменування об'єктів ПЗФ** | **Кількість, од.** | **Площа, га** | **Кількість, од.** | **Площа, га** | **Кількість, од.** | **Площа, га** |
| Природні заповідники | 1 | 883 | 0 | 0 | 1 | 883 |
| Біосферні заповідники | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Національні природні парки | 2 | 39575 | 0 | 0 | 2 | 39575 |
| Дендрологічні парки | 1 | 21 | 3 | 5 | 4 | 26 |
| Регіональні ландшафтні парки | 0 | 0 | 1 | 98858 | 1 | 98858 |
| Заказники, усього | 10 | 9658 | 131 | 29181 | 141 | 38839 |
| Парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва | 2 | 312 | 21 | 332 | 23 | 644 |
| Інші об'єкти | | | 30 | 170 | 35 | 282 |
| **Разом** | **19** | **50456** | **300** | **128770** | **319** | **179338** |

**Примітка:* джерело (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023).

Більшість цих територій (98,8 тис. га, або 55,1 %) займають природні (комплексні) ландшафтні заказники регіонального значення, у яких немає вилучення території з господарського використання, а контроль над дотриманням природоохоронного режиму недостатньо суворий, через не зареєстровані в державному земельному кадастрі обмеження у використанні земельних та інших природних ресурсів і біорізноманіття.

Повномасштабне вторгнення в Україну завдає незворотного катастрофічного впливу на довкілля, зокрема забруднюючи та пошкоджуючи ґрунтовий покрив (Меньшов та ін., 2024), що посилює проблему деградації ґрунтів (Tonkha et al., 2025), їх забруднення. Ступінь екологічної небезпеки території, на якій відбуваються бойові дії, визначається насамперед рівнем приземних концентрацій забруднювальних речовин, що потрапляють у природне середовище (Bilyi et al., 2025). Пряме влучання снарядів, згоріла військова техніка та нафтопродукти руйнують екосистему (Меньшов та ін., 2024).

**Методи**

Проведене дослідження підтверджує можливість оцінки перспектив формування єдиного природно-екологічного каркасу Сумської області України на основі даних регіональної екологічної мережі. Оцінка співвідношення в межах адміністративних утворень різних категорій земель чи типів землекористування в контексті природоохоронного значення за критерієм ресурсоспоживаюче (Skliar et al., 2021) (ресурсоексплуатуюче), середовищеохоронне та резервне землекористування дає змогу виробити рекомендації щодо трансформації структури землекористування (Makarova et al., 2023) для переведення земель у категорію елементів, які охороняються, і буферних зон природно-екологічного каркасу системи землекористування.

Аналіз свідчить, що землекористування до формування екологічної мережі в Сумській області належить до стабільно нестійкого ($К_{ек.ст}$=0,39). Екологічна стабільність землекористування після формування землекористування

екологічної мережі як базової основи природно-екологічного каркасу реєстрації у державному земельному кадастрі обмежень у використанні земель, згідно з регіональною схемою переходить до середньої стабільності ($К_{ек.ст}$=0,54). Землекористування в межах Сумській області перебуває в екологічно кризовому стані, що суттєво впливає на здоров'я людей.

**Результати**

Формування природно-екологічного каркасу системи землекористування, за дослідженнями українських учених, сприймається як чинник, що сприяє поліпшенню екологічної обстановки (Третяк, Третяк, & Гунько, 2016а; Третяк та ін., 2016б). Природно-екологічний каркас – це синтез існування людини та використовуваних нею природних ресурсів з найефективнішими природоохоронними заходами. Метою концепції природно-екологічного каркасу є створення системи належним чином охоронюваних екологічно взаємопов'язаних природних територій, що забезпечує збереження (за необхідності самовідновлення) природного біорізноманіття, умови для міграції рідкісних та особливо цінних видів тварин, організацію системи громадської підтримки цього фрагмента екологічної мережі.

Такий підхід спрямований на забезпечення гармонійного поєднання економічних, соціальних та екологічних інтересів у сфері землекористування. Важливим аспектом цього процесу є врахування природної й екологічної складової територій, яка є невід'ємною частиною земельної системи країни. Для зниження антропогенного навантаження та стабілізації екологічної ситуації в регіоні дослідження потрібні зміни у структурі землекористування (Rybina et al., 2022), що забезпечують зростання частки земель, які виконують середовищеформуючі функції. Одним із варіантів ефективного впровадження необхідних змін у структуру землекористування є формування природно-екологічного каркасу системи землекористування, який включає ділянки з різними режимами землекористування, що утворює просторово організовану інфраструктуру (Kapinos et al., 2021), яка підтримує екологічну стабільність території, запобігаючи втраті біорізноманіття та деградації ландшафту.

Відповідно до статті 3 Закону України "Про екологічну мережу України" ***екомережа*** – "це єдина територіальна система, яка утворюється з метою поліпшення умов для формування та відновлення довкілля, підвищення природно-ресурсного потенціалу території України, збереження ландшафтного та біорізноманіття, місць оселення та зростання цінних видів тваринного і рослинного світу, генетичного фонду, шляхів міграції тварин через поєднання територій та об'єктів природно-заповідного фонду, а також інших територій, які мають особливу цінність для охорони навколишнього природного середовища і відповідно до законів та міжнародних зобов'язань України підлягають особливій охороні" (Верховна Рада України, 2004).

Згідно з положеннями цієї ж статті до об'єктів екомережі належать території та об'єкти природно-заповідного фонду, водного фонду, лісового фонду, сільськогосподарські угіддя екстенсивного використання (пасовища, сіножаті) тощо. Структурні елементи екомережі – це "території екомережі, що відрізняються за своїми функціями. До структурних елементів екомережі належать ключові, сполучні, буферні та відновлювані території. Ключові території забезпечують збереження найбільш цінних і типових для даного регіону компонентів ландшафтного та біорізноманіття. Сполучні території (екокоридори) поєднують між собою ключові території, забезпечують міграцію тварин та обмін генетичного матеріалу. Буферні території забезпечують захист ключових та сполучних територій від зовнішніх впливів. Відновлювані території забезпечують формування просторової цілісності екомережі, для яких мають бути виконані першочергові заходи щодо відтворення первинного природного стану" (Верховна Рада України, 2004).

Екологічна мережа – це сукупність функціонально та територіально взаємопов'язаних природних територій, які особливо охороняються, управляються на основі єдиної політики й організовуються з урахуванням природних і соціально-економічних особливостей регіону з метою забезпечення збереження, відновлення та підтримання природної рівноваги навколишнього середовища, біологічного та ландшафтного різноманіття. Головною метою створення такої мережі є формування об'єднання екологічно цінних територій зі збереженою або близькою до неї природною рослинністю, системи екологічних коридорів з метою стимуляції умов для заселення та міграції видів, забезпечення виживання та відновлення популяцій, збереження й охорони середовища їх проживання. Визначення екологічних мереж широко використовують вчені для планування землекористування з наданням пріоритету збереження простору (Jalkanen, Toivonen, & Moilanen, 2020). Перевагами екологічної мережі відзначають вирішення проблем інтенсифікації землекористування та фрагментації, що дозволяє природним популяціям видів та зникаючим середовищам існування вижити (Jongman, 2008). Екологічні мережі є ефективним відображенням складності природних угруповань і допомагають виявити механізми, що сприяють їх стійкості, стабільності та функціонуванню (Poisot et al., 2015). Екологічна мережа належить до структури екологічних компонентів, які можна отримати за допомогою географічних і технічних підходів для підтримки більшої кількості діапазонів екологічного різноманіття (Ma, Teh, & Kho, 2024).

Вивчення структури ландшафту та фізико-географічного районування є необхідною умовою для складання проєкту екологічних мереж, оскільки дає змогу виявити мало порушені природні території, що мають велике значення для підтримки екологічної рівноваги (Kapinos et al., 2025). Ґрунтуючись на загальноприйняті уявленнях про екологічну мережу України як базову основу природно-екологічного каркасу передбачається, що потенціал територій формує його функціональні елементи (Третяк, Третяк, & Гунько, 2016а). До ядр і вузлів (ключових територій) природно-екологічного каркасу відносять найменш змінені діяльністю людини території, до яких у Сумській області України включені території природно-заповідного фонду, зазвичай національного значення. Оскільки природно-заповідний фонд регіонального значення представлений заказниками, території яких не вилучаються з господарського обороту, віднесення їх до ядер або вузлів природно-екологічного каркасу є недоцільним. До середовище формуючих територій можуть бути віднесені землі лісового фонду, що належать до 1-ї групи лісів і виконують переважно водоохоронні, захисні та оздоровчі функції. Як екологічні коридори можна розглядати водоохоронні зони водних об'єктів, що мають обмеження до землекористування. Як сполучні елементи можливе також використання полезахисних лісосмуг у разі виконання ними функції підтримки речовинно-енергетичних та інформаційних потоків у ландшафтах.

Закон України як базова основа природно-екологічного каркасу ґрунтується на трьох функціонально взаємодоповнюючих компонентах:

а) центральні зони (вузли або ключові території), які забезпечують оптимальну кількість та якість екологічного простору;

б) коридори (транзитні території), що забезпечують необхідний взаємозв'язок між ключовими територіями;

в) буферні зони (буферні території), призначені для захисту ключових і транзитних територій від потенційно небезпечних зовнішніх впливів.

Компоненти екологічної мережі виконують три функції (рис. 2), а саме:

1) забезпечення оптимальної досяжності кількості та якості екологічного простору через вузли або ключові території;

2) забезпечення та здійснення необхідного зв'язку між ключовими територіями через транзитні території;

3) захист ключових та транзитних територій від потенційно небезпечних зовнішніх факторів впливу через буферні зони.

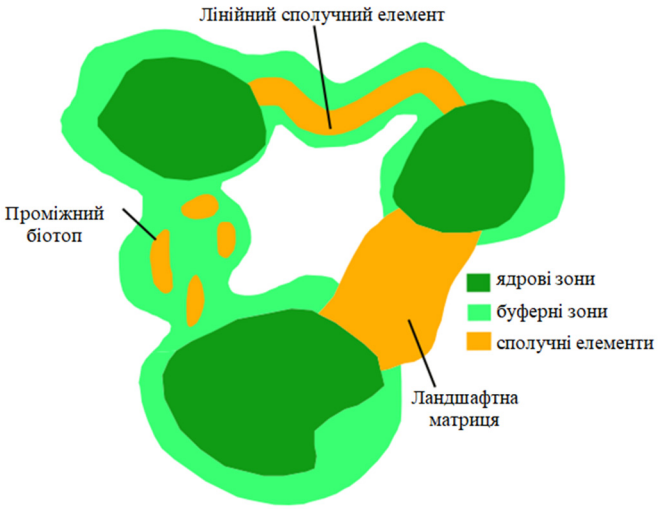



**Рис. 2. Логічно-змістовна схема сутності функціональних компонентів екологічної мережі як базової основи природно-екологічного каркасу (Kohler, 2023)**

Визначаючи специфіку використання земельно-ресурсного потенціалу в сучасних ринкових умовах, необхідно враховувати саме особливості землі як унікального природного об'єкта, ґрунту, який є цінним ресурсом, що важко відновлюється (Apostu et al., 2024), що об'єктивно вимагає в будь-якій соціально-економічній структурі активного та різнобічного втручання органів державного управління в розподіл, перерозподіл, використання і відновлення земельних ресурсів.

Важливою класифікаційною ознакою інтенсивності використання земельних та інших природних ресурсів і впливу на біорізноманіття є ступінь господарського освоєння території (Третяк та ін., 2016б), яка поділяються на три основні групи: 1) переважно середовищеохоронного використання та екологічного резерву; 2) екстенсивного господарського використання; 3) інтенсивного господарського використання.

Типологічний поділ землекористування утворює територіальну структуру землекористування. Важливе значення у структурі землекористування має співвідношення типологічних виділів, сумісних із категоріями земель і які мають різну вартість, екологічну цінність, різний ступінь інерційності і мінливості. Дані характеристики дають змогу предметно обґрунтувати напрями раціоналізації землекористування та перейти від типологічної диференціації до територіально-просторового планування (Perry et al., 2002) розвитку природоохоронного землекористування.

Як модельний регіон обрано Сумську область України, яка розташована в межах двох природно-кліматичних зон: Полісся та Лісостеп. Ґрунтовий покрив представлений чорноземами типовими, опідзоленими, дерново-підзолистими, ясно-сірими, сірими лісовими, темно-сірими лісовими ґрунтами і здатен повністю задовольнити потреби області у виробництві рослинного білку, що використовується безпосередньо для харчування людей та відгодівлі сільськогосподарських тварин. За даними регіональної доповіді про стан навколишнього природного середовища в Сумській області України у 2023 р. (Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023), загальна площа сільськогосподарських угідь становить 1,7 млн га, у тому числі ріллі – 1,2 млн га. Загальна площа земель лісового фонду Сумської області України становить 452,1 тис. га, з яких вкрито лісовою рослинністю 425 тис. га. Загальна лісистість області сягає 17,9 %, що на 2 % більше, ніж середня по Україні. На одного жителя області припадає 0,42 га лісу. За площею лісового фонду область посідає дев'яте місце серед областей України.

Як приклад у (табл. 2) приведено характеристику землекористування Сумської області України в контексті природоохоронного значення або можливого віднесення до такого.

Як показує аналіз (табл. 2) в Сумській області України станом на 2021 р. налічувалося 943,7 тис. га, або 39,6 % земель природоохоронного значення від загальної площі. Це землекористування характеризується як: 1) ресурсоспоживаюче (ресурсоексплуатуюче) – 39,6 %, в т. ч. сільськогосподарський тип – 30,1 %; 2) середовищеформуюче (місцеексплуатуюче) – 2,7 %, в т. ч. громадсько-комерційний тип – 2,7 %; 3) середовищеохоронне – 50,4 %, в т. ч. природно-заповідний тип – 0,8%, природоохоронний ресурснозахисний тип – 17,9 %, лісогосподарський – 28,4 %, водогосподарський – 3,3 %; 4) резервне (запасне) – 7,3 %, в т. ч. тип землекористування запасу – 7,3 %.

Питання оптимальної відповідності між станом землекористування та його режимом суттєво впливає на екологічний стан землекористування. Для визначення екологічного стану землекористування до і після формування землекористування екологічної мережі в Сумській області України проведено його оцінювання. Так, на основі даних коефіцієнта екологічної стабільності ($К_{ек.ст}$) (Третяк, Третяк, & Гунько, 2016а; Третяк та ін., 2016б) проведено розрахунок (табл. 3) екологічної стабільності землекористування екологічної мережі в Сумській області до і після її формування згідно з даними регіональної схеми (Сумська обласна рада, 2020).

Аналіз (табл. 3) свідчить, що землекористування до і після формування екологічної мережі в Сумській області України належить до стабільно нестійкої ($К_{ек.ст}=0,39$). Екологічна стабільність землекористування після формування землекористування екологічної мережі як базової основи природно-екологічного каркасу та реєстрації у Державному земельному кадастрі обмежень у використання земель, згідно з регіональною схемою переходить до середньої стабільності ($К_{ек.ст}=0,54$). Отже, землекористування в межах Сумської області України перебуває в екологічно кризовому стані, що суттєво впливає на здоров'я людей.

Зважаючи на те, що території з найбільш суворим природоохоронним статусом включені до складу ключових територій (ядер) передбачуваного каркасу, а вузли включають великі лісові масиви та природно-заповідний фонд регіонального значення, цілісність природно-екологічного каркасу системи землекористування не може бути забезпечена внаслідок високого ступеня перетвореності територій, які формують лінійні елементи каркасу. Передбачувані екологічні коридори здебільшого розташовуються в межах різних категорій земель, що інтенсивно використовуються нині: для сільськогосподарського господарства, а в деяких випадках і земель промисловості. В умовах даного регіону практична реалізація пропозицій щодо формування природно-екологічного каркасу системи землекористування здебільшого передбачає переведення земель з однієї категорії в іншу, включаючи неминучу в таких випадках зміну власника земель та вирішення питань економічного, правового та адміністративного характеру. У зв'язку із цим аналіз структури землекористування та оцінка потенціалу різних категорій земель або типів землекористування є важливою умовою вироблення рекомендацій щодо режиму землекористування різних ділянок природно-екологічного каркасу системи землекористування для його ефективного функціонування.

За потреби переведення сільськогосподарських угідь з юридичного погляду можливе під час створення будь-якої категорії земель. При цьому можливе і переведення ріллі при оптимізації сільськогосподарського землекористування (Skliar et al., 2021). Для цього із сільськогосподарського обороту виключаються найменш ефективні для вирощування сільськогосподарських культур ділянки на користь альтернативного використання, таких як пасовища або під консервацію з метою подальшого відновлення продуктивності. На таких територіях розв'язуються проблеми відновлення екологічної рівноваги на сильно порушених та деградуючих землях для поступового їх повернення у сферу землекористування, вже як елементи природно-екологічного каркасу. У цьому контексті оптимальним варіантом є використання земель, на яких відзначається низька врожайність (*еродовані, заболочені, засолені тощо*). У той самий час виділити малопродуктивні ділянки у зоні поширення родючих чорноземів досить складно. У зв'язку із цим гостро постає питання економічної ефективності використання таких земель.

***Таблиця 2***

**Характеристика існуючого землекористування Сумської області України в контексті природоохоронного значення станом на 2021 р.***

| № | Типи та підтипи землекористування в контексті природоохоронного значення | Площа | |
|---|---|---|---|
| | | тис. га | % |
| I | ***Ресурсоспоживаюче (ресурсоексплуатуюче) землекористування*** | **373,8** | **39,6** |
| 1 | Сільськогосподарський тип | 284,4 | 30,1 |
| 1.1 | ґрунтозахисний підтип | - | |
| 1.2 | сінокосо-пасовищний підтип (73,9 +194,3) | 268,2 | 28,4 |
| 1.3 | Присадибний підтип | 16,2 | 1,7 |
| 1.4 | сільськогосподарський нетрадиційний підтип | - | |
| 2 | Лісопромисловий | 89,4 | 9,5 |
| II | ***Середовищеформуюче (місцеексплуатуюче) землекористування*** | **25,9** | **2,7** |
| 2 | Громадсько-комерційний тип | 25,9 | 2,7 |
| 2.1 | рекреаційний міської рекреації (*зелені насадження*) підтип | 25,8 | 2,7 |
| 2.2 | лікувально-курортологічний підтип | 0,1 | 0,0 |
| III | **Середовищеохоронне землекористування** | **475,5** | **50,4** |
| 3 | Природнозаповідний тип | 7,5 | 0,8 |
| 4 | Природоохоронний ресурсозахисний тип | 169,0 | 17,9 |
| 4.1 | підтип землекористування екомережі | 152,6 | 16,2 |
| 4.2 | підтип землекористування водоохоронних зон, лісозахисних смуг, масивів відновлення родючості земель | 13,0 | 1,4 |
| 4.3 | історико-культурний підтип | 3,4 | 0,4 |
| 5 | Лісогосподарський | 268,1 | 28,4 |
| 6 | Водогосподарський | 30,9 | 3,3 |
| IV | ***Резервне (запасне) землекористування*** | **68,5** | **7,3** |
| 7 | Тип землекористування запасу | 68,5 | 7,3 |
| 7.1 | підтип відкритих заболочених земель | 62,6 | 6,6 |
| 7.2 | підтип земель з незначним рослинним покривом | 5,9 | 0,6 |
| **Всього** | | **943,7** | **100,0** |
| ***Питома вага від загальної площі області*** | | | ***39,6*** |

**Примітка:* Сформовано авторами на основі даних Головного управління Держгеокадастру Сумської області.

***Таблиця 3***

**Розрахунок екологічної стабільності землекористування до і після формування екологічної мережі в Сумській області України станом на 2021 р.***

| Земельні угіддя | Коеф. ек. стаб. ($К_{ек.ст}$) угідь*. | Площа ($П$), тис. га | Добуток ($П$ х $К_{ек.ст}$) |
|---|---|---|---|
| ***1) Екологічна стабільність землекористування до формування екологічної мережі за даними ДЗК*** | | | |
| Сільськогосподарські угіддя, з них: | | | |
| ріллля | 0,14 | 1226,3 | 171,7 |
| багаторічні насадження (сади) | 0,43 | 24,4 | 10,5 |
| сіножаті | 0,62 | 280,4 | 173,8 |
| пасовища | 0,68 | 166,8 | 113,4 |
| Під господарськими шляхами, сільськогосподарськими та іншими господарськими будівлями і дворами | 0,10 | 39,6 | 4,0 |
| Ліси та інші лісовкриті площі | 0,80 | 409,0 | 327,2 |
| Ліси природоохоронного значення | 0,90 | 51,9 | 46,7 |
| Землі забудови | 00,0 | 84,6 | 0,0 |
| Під водою та заболочені землі | 0,79 | 93,5 | 73,9 |
| Інші землі | 0,50 | 5,9 | 3,0 |
| **Загальна площа** | **0,39** | **2383,2** | **924,1** |
| ***2) Екологічна стабільність землекористування екологічної мережі згідно з даними регіональної схеми*** | | | |
| Сільськогосподарські угіддя, з них: | | | |
| ріллля | 0,14 | 1226,3 | 171,7 |
| багаторічні насадження (сади) | 0,43 | 24,4 | 10,5 |
| сіножаті у складі екомережі | 0,68 | 280,4 | 190,7 |
| Пасовища у складі екомережі | 0,75 | 166,8 | 125,1 |
| Під господарськими шляхами, сільськогосподарськими та іншими господарськими будівлями і дворами | 0,10 | 39,6 | 4,0 |
| Ліси та інші лісовкриті площі природоохоронного значення | 0,90 | 44,4 | 40,0 |
| захисні ліси | 0,80 | 68,9 | 55,1 |
| рекреаційно-оздоровчі ліси | 0,74 | 52,2 | 38,6 |
| експлуатаційні ліси | 0,68 | 130,0 | 88,4 |
| інші лісовкриті площі | 0,74 | 157,9 | 116,8 |
| Землі забудови | 00,0 | 84,6 | 0,0 |
| Під водою та заболочені землі | 0,79 | 50,9 | 40,2 |
| Землі водного фонду прибережних захисних смуг | 0,72 | 38,6 | 27,8 |
| Природно-заповідний фонд (ПЗФ) | 0,95 | 176,5 | 167,7 |
| водоохоронні зони | 0,68 | 295,5 | 200,9 |
| Інші землі | 0,50 | 46,2 | 23,1 |
| **Загальна площа** | **0,54** | **2383,2** | **1300,6** |

**Примітка:* джерело (Третяк та ін., 2023).

У межах запропонованого природно-екологічного каркасу системи землекористування наголошується на використанні земельних угідь сінокосів і пасовищ, на яких мають використовуватися екстенсивні методи їх використання. Переведення цих територій з інтенсивного господарського використання в ощадливий режим використання може поставити під сумнів добровільності фермерських господарств та сільськогосподарських підприємств у таких заходах, що призведе до негативних економічних та соціальних наслідків (Tretiak et al., 2025). Вивчення перспектив зміни характеру використання земель, зайнятих нині під ріллю та пасовища, потребує додаткового економічного та правового обґрунтування, тому перелічені земельні угіддя повинні розглядатися як землі із середнім потенціалом для включення до природно-екологічного каркасу системи землекористування.

Таким чином, формування природно-екологічного каркасу системи землекористування як єдиної територіальної структури регіонального рівня, що виконує функції підтримки екологічної стабільності, у регіоні пов'язане з великими труднощами та потребує системного підходу. В умовах переважання сільськогосподарських угідь вирішення цього завдання може розглядатися в контексті нормалізації структури земельних угідь: необхідно обґрунтувати вибір орних земель, використання яких збиткове, для можливого переведення їх, наприклад, у категорію пасовищ. Такі орні землі можуть розглядатися як елементи реставраційного фонду та включатися до природно-екологічного каркасу. У зв'язку із цим актуальним залишається питання вдосконалення законодавчої бази щодо регулювання земле- та природоохоронної діяльності: одним із серйозних обмежень до реалізації пропозицій щодо формування природно-екологічного каркасу системи землекористування є відсутність у законодавстві поняття "екологічний каркас", "елемент екологічного каркасу", "функціональне використання земель", "трансформація функціонального використання земель".

**Дискусія і висновки**

Проведене дослідження підтверджує можливість оцінки перспектив формування єдиного природно-екологічного каркасу Сумської області України на основі даних регіональної екологічної мережі. Оцінка співвідношення в межах адміністративних утворень різних категорій земель чи типів землекористування в контексті природоохоронного значення за критерієм ресурсоспоживаюче (ресурсоексплуатуюче), середовищеохоронне та резервне землекористування дає змогу виробити рекомендації щодо трансформації структури землекористування для переведення земель у категорію елементів, які охороняються, і буферних зон природно-екологічного каркасу системи землекористування.

За підсумками проведеної оцінки передумови формування природно-екологічного каркасу системи землекористування в Сумській області України можуть бути визначені як сприятливі. Серйозним стримуючим чинником формування екологічного каркасу є включення до системи землекористування екологічної мережі сільськогосподарських угідь. У зв'язку із цим створення

природно-екологічного каркасу системи землекористування області України та інших регіонів нині більшою мірою залежить від розвитку і вдосконалення правових механізмів. Вочевидь, що у земельному та природоохоронному законодавстві має бути закріплено як поняття "екологічний каркас", "елемент екологічного каркаса", "функціональне використання земель", "трансформація функціонального використання земель". У цьому випадку стане можливим визначення відповідних режимів землекористування, що дозволяють знизити антропогенну дію на територію індивідуально для кожного елемента каркасу. Збільшити частку земель з ощадним землекористуванням у межах Сумської області України за короткий проміжок часу неможливо, але потрібно здійснити реєстрацію територіальних обмежень у використанні земель у межах структурних елементів екомережі та створити необхідне правове забезпечення. З іншого боку, збільшення частки земель, що виконують средовищеформуючі функції, має супроводжуватися диверсифікацією та інтенсифікацією землекористування на територіях поза природно-екологічним каркасом.

**Внесок авторів:** Антон Третяк – ідея, концептуалізація, методологія, написання; Валентина Третяк – концептуалізація, методологія, написання; Наталія Капінос – формальний аналіз, програмне забезпечення, валідація даних; Вікторія Стрельник – написання (перегляд і редагування), валідація даних; Наталія Петрова – написання тексту, написання (редагування).

**Список використаних джерел**

Верховна Рада України. (2004). *Про екологічну мережу України*. Закон України від 24. 06. 2004 р. № 1864-IV.. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text

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

Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. (2023). *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Сумській області*. https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini/

Сумська обласна рада. (2020). *Регіональна схема формування екомережі Сумської області: затверджена рішенням Сумської обласної ради від 22.12.2021*. https://sorada.gov.ua/dokumenty-oblrady/rishennja-oblasnoji-rady/8-sklykannja/category/252-rishennja-9-sesiji-22122021.html

Третяк А. М., Третяк В. М., Колганова І. Г., Прядка Т. М., Капінос Н. О., & Лобунько Ю. В. (2023). *Стандартизація та нормування у землеустрої*. Біла Церква.

Третяк, А., Третяк, В., & Гунько, Л. (2016а). *Землевпорядне проектування. Організація землекористування структурних елементів екомережі України на місцевому рівні. Ч. 4*. ОЛДІ-Плюс.

Третяк, А., Третяк, В., Гунько, Л., & Лобунько, Ю. (2016б). *Організація землекористування структурних елементів екомережі України на місцевому рівні*. ДП "Компринт".

Apostu, I.-M., Faur, F., Lazăr, M., & Traistă, E. (2024). Quality of the soils on degraded mining lands and possibilities of restoring their fertility - case study: Rovinari coal basin. *AgroLife Scientific Journal*, 13(2), 40–54. https://doi.org/10.17930/AGL202424

Bilyi, T., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., Melnyk, G., Cherkes, S., & Litvinov, D. (2025). The degree of soil degradation and aerosol formation from explosion products resulting from hostilities in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 39–46. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.05

Cojocaru, O., & Abramov, A. (2023). Dynamics of ecological and agro-ecological indices (under conditions of physical and chemical degradation) of soils researched on the genetic horizons. *AgroLife Scientific Journal*, 12(1), 40–52. https://doi.org/10.17930/AGL202316

Jalkanen, J., Toivonen, T., & Moilanen, A. (2020). Identification of ecological networks for land-use planning with spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology*, *35*, 353–371. https://doi.org/10.1007/s10980-019-00950-4

Jongman, R. (2008). Ecological Networks are an Issue for All of US. *Journal of Landscape Ecology*, 1(1). https://doi.org/10.2478/v10285-012-0001-8

Kapinos, N., Goncharov, V., Rybina, O., & Prokopenko, N. (2021). Experience of land use development planning at the local (municipal) level in the European Union. *AgroLife Scientific Journal*, 10(2). https://doi.org/10.17930/AGL2021210

Kapinos, N., Skliar, Yu., Rybina, O., Strelnyk, V., & Bohinska, L. (2025). Planning the Development of Land Use of Territorial Communities by the Method of Ecological and Landscape Design. У *International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation (MistoBud-2025)*. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012059

Kohler, Y. (2023). The role of alpine protected areas in the spatial planning of ecological connectivity in their regional context. *Sciences Eaux & Territoires*, 43, 15–20. https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2023.43.7383

Ma, T. Z., Teh, B. T., & Kho, M. Y. (2024). Land use change and Ecological Network in rapid urban growth region in Selangor region, Malaysia. *Scientific Reports*, 14(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-67294-1

Makarova, V., Mykhailov, A., Bezuhla, L., Matviienko, H., & Marynenko, N. (2023). Management of Ecological Land Destructions as a Basis for the Formation of Green Marketing. *Review of Economics and Finance*, 21, 383–392. https://refpress.org/ref-vol21-a39/

Masiuk, O., Dziuman, V., & Matsiuk, V. (2024). The use of GIS technologies in determining the method of reclamation for phytotoxic mine waste dumps. У *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"* (pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510038

Perry, J. N., Liebhold, A. M., Rosenberg, M. S., Dungan, J., Miriti, M., Jakomulska, A., & Citron-Pousty, S. (2002). Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial pattern in ecological data. *Ecography*, 25, 578–600. https://doi.org/10.1034/j.1600-0587.2002.250507.x

Poisot, T., Baiser, B., Dunne, J., Kéfi, S., Massol, F., Mouquet, F., Romanuk, T., Stouffer, D., Wood, S., & Gravel, D. (2015). Mangal - making ecological network analysis simple. *Ecography*, 39(4), 384–390. https://doi.org/10.1111/ecog.00976

Rybina, O., Kadhim, I., Adnan, D., Yusra, A., Goncharov, V., Prokopenko, N., & Boginskaya, L. (2022). Experience of Land Use Development Planning at the Local (Municipal) Level in the European Union. *Journal of Information Technology Management*, 14(2), 56–69. https://doi.org/10.22059/jitm.2022.86927

Skliar, Yu., Bohinska, L., Kapinos, N., & Prokopenko, N. (2021). Improvement of Land Management in Ukraine. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 14(Special Issue), 175–183. https://doi.org/10.22094/JOIE.2020.677866

Tonkha, O., Menshov, O., Litvinov, D., Bondar, K., Glazunova, O., Litvinova, O., Pikovska, O., & Zabaluev, V. (2025). Estimation of pollution levels of soils in southern Ukraine damaged by hostilities. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 30–38. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04

Tretiak, A., Tretiak V., Kapinos, N., Strelnyk, V., & Petrova N. (2025). Formation of a natural and ecological framework land use at the regional level: methodological approaches. У *XVIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-046.pdf

**References**

Apostu, I.-M., Faur, F., Lazăr, M., & Traistă, E. (2024). Quality of the soils on degraded mining lands and possibilities of restoring their fertility - case study: Rovinari coal basin. *AgroLife Scientific Journal*, 13(2), 40–54. https://doi.org/10.17930/AGL202424

Bilyi, T., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., Melnyk, G., Cherkes, S., & Litvinov, D. (2025). The degree of soil degradation and aerosol formation from explosion products resulting from hostilities in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 39–46. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.05

Cojocaru, O., & Abramov, A. (2023). Dynamics of ecological and agro-ecological indices (under conditions of physical and chemical degradation) of soils researched on the genetic horizons. *AgroLife Scientific Journal*, 12(1), 40–52. https://doi.org/10.17930/AGL202316

Jalkanen, J., Toivonen, T., & Moilanen, A. (2020). Identification of ecological networks for land-use planning with spatial conservation prioritization. *Landscape Ecology*, 35, 353–371. https://doi.org/10.1007/s10980-019-00950-4

Jongman, R. (2008). Ecological Networks are an Issue for All of US. *Journal of Landscape Ecology*, 1(1). https://doi.org/10.2478/v10285-012-0001-8

Kapinos, N., Goncharov, V., Rybina O., & Prokopenko, N. (2021). Experience of land use development planning at the local (municipal) level in the European Union. *AgroLife Scientific Journal*, 10(2). https://doi.org/10.17930/AGL2021210

Kapinos, N., Skliar, Yu., Rybina, O., Strelnyk, V., & Bohinska, L. (2025). Planning the Development of Land Use of Territorial Communities by the Method of Ecological and Landscape Design. In *International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation (MistoBud-2025)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. https://doi:10.1088/1755-1315/1499/1/012059

Kohler, Y. (2023). The role of alpine protected areas in the spatial planning of ecological connectivity in their regional context. *Sciences Eaux & Territoires*, 43, 15–20. https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2023.43.7383

Ma, T. Z., Tech, B. T., & Kho, M. (2024). Land use change and Ecological Network in rapid urban growth region in Selangor region, Malaysia. *Scientific Reports*, 14(1). https://doi.org/10.1038/s41598-024-67294-1

Makarova, V., Mykhailov, A., Bezuhla, L., Matviienko, H., & Marynenko, N. (2023). Management of Ecological Land Destructions as a Basis for the Formation of Green Marketing. *Review of Economics and Finance*, 21, 383–392. https://refpress.org/ref-vol21-a39/

Masiuk, O., Dziuman, V., & Matsiuk, V. (2024). The use of GIS technologies in determining the method of reclamation for phytotoxic mine

waste dumps. In *International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"*, 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510038

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. https://doi.org/10.17721/1728-2713.106.01 [in Ukrainian].

Perry, J. N., Liebhold, A. M., Rosenberg, M. S., Dungan, J., Miriti, M., Jakomulska, A., & Citron-Pousty, S. (2002). Illustrations and guidelines for selecting statistical methods for quantifying spatial patterns in ecological data. *Ecography*, 25, 578–600. https://doi.org/10.1034/j.1600-0587.2002.250507.x

Poisot, T., Baiser, B., Dunne, J., Kefi, S., Massol, F., Mouquet, N., Romanuk, T., Stouffer, D., Wood, S., & Gravel, D. (2015). mangal - making ecological network analysis simple. *Ecography*, 39(4), 384–390. https://doi.org/10.1111/ecog.00976

Ministry of Energy and Natural Resources of Ukraine. (2023). Regional report about the camp of superfluous natural environment in Suy region [in Ukrainian]. https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyjmonitoryng/regionalni-dopovidi-pro-stan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini

Sumy regional council. (2020). Regional molding scheme econetwork of the Sumy region: confirmed by the decisions of the Sumy region for the sake of dated 22.12.2021 [in Ukrainian]. https://sorada.gov.ua/dokumenty-oblrady/rishennjaoblasnoji-rady/8-sklykannja/category/252-rishennja-9-sesiji-22122021.html

Rybina, O., Kadhim, I., Adnan, D., Yusra, A., Goncharov, V., Prokopenko, N., & Boginskaya, L. (2022). Experience of Land Use Development Planning at the Local (Municipal) Level in the European Union. *Journal of Information Technology Management*, 14(2), 56–69. doi:10.22059/jitm.2022.86927

Skliar, Yu., Bohinska, L., Kapinos, N., & Prokopenko, N. (2021). Improvement of Land Management in Ukraine. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, 14(Special Issue), 175–183. doi:10.22094/JOIE.2020.677866

Tonkha, O., Menshov, O., Litvinov, D., Bondar, K., Glazunova, O., Litvinova, O., Pikovska, O., & Zabaluev, V. (2025). Estimation of pollution levels of soils in southern Ukraine damaged by hostilities. *Bulletin of the Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 30–38. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.04

Tretiak, A., Tretiak, V., Kapinos, N., Strelnyk, V., & Petrova N. (2025). Formation of a natural and ecological framework land use at the regional level: methodological approaches. In *XVIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. https://eage.in.ua/wp-content/uploads/2025/04/Mon25-046.pdf

Tretyak A. M., Tretyak V. M., Kolganova I. G., Pryadka T. M., Kapinos N. O., & Lobunko Yu. V. (2023) *Standardization and regulation in the world land management*. Bila Tserkva [in Ukrainian].

Tretyak, A., Tretyak, V., & Gunko, L. (2016a). *Land management design. Organization of land use of structural elements of the ecological network of Ukraine at the local level. Part 4.* Oldie Plus [in Ukrainian].

Tretyak, A., Tretyak, V., Gunko, L., & Lobunko, Yu. (2016b). *Organization of land use of structural elements of the ecological network of Ukraine at the local level.* DP "Komprynt" [in Ukrainian].

Verkhovna Rada of Ukraine. (2004). *On the Ecological Network of Ukraine.* Law of Ukraine dated 24. 06. 2004 No. 1864-IV [in Ukrainian].

**Отримано редакцією журналу / Received: 11.09.25**
**Прорецензовано / Revised: 10.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Anton TRETIAK[1] DSc (Econ.), Prof.**
**ORCID ID: 0000-0002-1154-4797**
**e-mail: tretyak2@ukr.net**

**Valentyna TRETIAK[2], DSc (Econ.), Prof.**
**ORCID ID: 0000-0001-6779-1941**
**e-mail: valentyna.tretiak@snau.edu.ua**

**Nataliia KAPINOS[2] PhD (Econ.), Assoc. Prof.**
**ORCID ID: 0000-0002-9354-5311**
**e-mail: nataliia.kapinos@snau.edu.ua**

**Viktoriia STRELNYK[2], PhD (Law), Assoc. Prof.**
**ORCID ID: 0000-0002-1068-8617**
**e-mail: viktoriia.strelnyk@snau.edu.ua**

**Nataliia PETROVA[2], DSc (Phil.), Assoc. Prof.**
**ORCID ID: 0000-0003-4242-2212**
**e-mail: nataliia.petrova@snau.edu.ua**

**[1] Bila Tserkva National Agrarian University, Bila Tserkva, Kyiv region, Ukraine**
**[2]Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine**

# FORMATION OF THE NATURAL AND ECOLOGICAL FRAMEWORK OF LAND USE AT THE REGIONAL LEVEL IN THE CONTEXT OF ENSURING ENVIRONMENTAL STABILITY: METHODOLOGICAL AND METHODICAL APPROACHES

**Background.** ***Assessment of the ratio within administrative entities of different categories of land or types of land use in the context of environmental value according to the criterion of resource-consuming (resource-exploiting), environmental and reserve land use allows developing recommendations for the transformation of the land use structure to transfer lands to the category of protected elements and buffer zones of the natural and ecological framework of the land use system.***

**Methods.** ***The ecological stability methodology was applied, which makes it possible to assess the prospects for the formation of a single natural and ecological framework of the Sumy region of Ukraine.***

**Results.** ***Based on the results of the assessment, the prerequisites for the formation of the natural and ecological framework of the land use system in the Sumy region of Ukraine according to the criterion of resource-consuming (resource-exploiting), environmental and reserve land use of environmental value can be determined as favorable. A serious limiting factor in the formation of the ecological framework is the inclusion of the ecological network of agricultural lands in the land use system. In this regard, the creation of a natural and ecological framework for the land use system of the Sumy region of Ukraine and other regions now depends to a greater extent on the development and improvement of legal mechanisms.***

**Conclusions.** ***The concepts of "ecological framework", "element of ecological framework", "functional use of land", "transformation of functional use of land" should be enshrined in land and environmental legislation, which will allow determining the appropriate land use regimes, as well as reducing the anthropogenic impact on the territory individually for each element of the framework. An increase in the share of lands that perform environment-forming functions should be accompanied by diversification and intensification of land use in territories outside the natural and ecological framework.***

**Keywords:** ***natural and ecological framework, land use, ecological network, ecological stability.***

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

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

UDK 550.3 (519.21)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.12

Zoya VYZHVA[1], DSc (Phys.-Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-6338-3892
e-mail: zoya_vyzhva@ukr.net

Vsevolod DEMIDOV[1], PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0009-0003-9472-6530
e-mail: demidov@knu.ua

Andrii VYZHVA[2], PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher
ORCID ID: 0009-0003-6699-5848
e-mail: motomustanger@ukr.net

Tetiana SHOVKOPLIAS[1], PhD (Phys.-Math.), Assist. Prof.
ORCID ID: 0009-0004-8991-0285
e-mail: 1zagmat.tetyana1@knu.ua

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]SE "Naukanaftogaz", Kyiv, Ukraine

# THE STATISTICAL SIMULATION OF DATASET IN 3D AREA WITH PENTAMODEL TYPE VARIOGRAM TO RIVNE NPP GEOPHYSICAL MONITORING

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником Олександром МЕНЬШОВИМ*)

**Background.** *This paper presents a statistical modeling approach for three-dimensional spatial data using a pentamodel type variogram, which provides an optimal mean-square approximation. The proposed method is applied to supplement geophysical survey data for karst-suffusion processes in monitoring the density of the chalk stratum in the Rivne Nuclear Power Plant (RNPP) area. A comprehensive set of geophysical investigations was conducted in the RNPP site area.*

*Among these investigations, radioisotope measurements of soil density and moisture around the constructed facilities are of primary interest. However, the available observation dataset, derived from 29 wells using radioisotope methods, was insufficient for high-resolution density characterization.*

*To address this limitation, a statistical modeling technique based on the pentamodel variogram was employed, enabling the reconstruction of the random field representing the studied parameter at any point within the 3D domain of interest.*

**Methods.** *A statistical model of the averaged density distribution of the chalk stratum within the study area was developed using the spectral decomposition of random fields in 3D space. The algorithm allows for generating realizations of random fields with predefined correlation structures, ensuring spatial discretization consistent with the required accuracy and resolution for geophysical monitoring applications.*

**Results.** *An algorithm for statistical modeling of random fields with pentamodel type correlation functions was formulated and implemented. Using the developed software, additional realizations of the random component of the chalk density field were generated on a regular observation grid with the desired level of detail. A comparison of a set of correlation functions for one data set in mean-square was performed. A statistical analysis of the simulated results was performed, including validation against the original observation data and an assessment of the adequacy and convergence of the modeled fields.*

**Conclusions.** *The proposed statistical modeling method, based on pentamodel type correlation functions, provides a robust framework for supplementing sparse geophysical datasets with high accuracy. This approach significantly improves the reliability of density distribution estimates and can be effectively applied to geophysical monitoring and the interpretation of spatially distributed geological parameters.*

**Keywords:** *Statistical simulation, pentamodel variogram, spectral decomposition, conditional maps, Rivne Nuclear Power Plant (RNPP).*

## Background

The study of hazardous natural and anthropogenic phenomena and disasters represents a critical scientific challenge that requires the implementation of comprehensive environmental monitoring systems, including geological monitoring, supported by modern mathematical methods, information technologies, and analytical tools. In the context of monitoring potentially hazardous anthropogenic facilities, several significant issues arise, such as the temporal and spatial irregularity of data, incomplete databases, insufficient data volume, and the need to supplement existing datasets with the required spatial resolution without conducting additional field investigations.

The theoretical foundations of statistical modeling methods based on spectral decomposition of random fields for solving various applied problems have been extensively discussed in the literature (Yadrenko, 1983; Guyon, 1993; Chiles, Delfiner, 2012; Vyzhva, 2003, 2011, 2021).

In several studies by the authors, practical investigations were carried out using measured chalk density data within a three-dimensional domain at the Rivne Nuclear Power Plant (RNPP) site. Various correlation functions were applied, including the Bessel correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013), the Cauchy correlation function (Vyzhva et al., 2014b), the spherical correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2020), the "cubic" correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2024), and the pentamodel type correlation function (Vyzhva et al., 2023).

In this study, we propose an enhanced method and algorithm for numerical modeling of random field realizations using pentamodel type correlation functions. It is worth noting that statistical modeling methods for three-dimensional random fields applied in Earth sciences have been developed by numerous researchers, including Mantoglou, & Wilson (1981), Wackernagel (2003), Emery (2006), Webster, & Oliver (2007), Chiles, & Delfiner (2012), and Tolosana-Delgado, & Mueller (2021), among others.

© Vyzhva Zoya, Demidov Vsevolod, Vyzhva Andrii, Shovkoplias Tetiana, 2025

ISSN 1728-3817

***Current challenges in monitoring karst-suffusion Processes at the Rivne NPP.*** The problem of modeling random fields in a three-dimensional domain arises when addressing critical tasks of ecological and geophysical monitoring. Over the years, a comprehensive series of geophysical studies has been conducted in the area of the Rivne Nuclear Power Plant (RNPP). Among these monitoring activities, the most significant are radioisotope investigations of soil density and moisture around the perimeter of constructed facilities at the site. Soil density was determined using the gamma-gamma logging method, while soil moisture was measured by neutron-neutron logging.

Geophysical monitoring studies are conducted periodically over an extended time within the industrial zone of the Rivne NPP (Vyzhva et al., 2010). For the monitoring program described in Vyzhva, Demidov, & Vyzhva (2013, 2014a), a key challenge was the need to supplement the dataset obtained from radioisotope-based control of chalk density variations within the industrial testing site using a grid of 29 wells. A schematic representation of the measured chalk density values and the well locations at the RNPP site is presented in Fig. 1. These data are insufficient to fully characterize the state of the chalk strata in the study area, where karst-suffusion processes have been significantly intensified by aggressive groundwater activity.

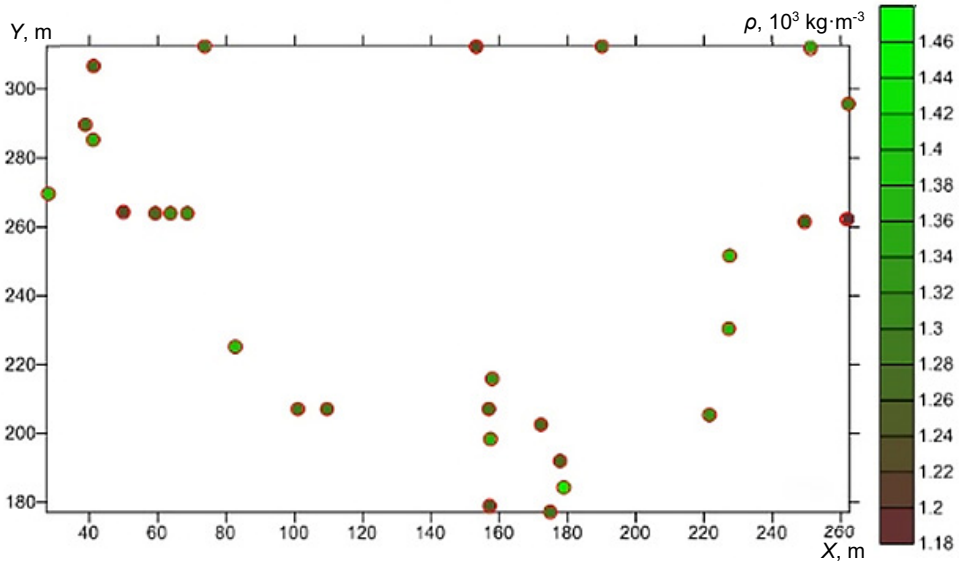



**Fig. 1. Observation points and chalk strata averaged density at industrial area of Rivne NPP**

In this study, we continue the development of three-dimensional statistical modeling methods based on correlation functions, specifically employing the pentamodel type correlation function, which is well established in geostatistical research (Chiles et al., 2005, Chiles, Delfiner, 2012; Vyzhva et al., 2023). This approach was applied to a dataset of chalk density measurements collected from 1984 to 2002 across 29 wells at the RNPP industrial site at depths of 28, 29, and 30 meters below the surface. The difference between the density values from the input map and the trend was primarily characterized as a stationary, homogeneous, isotropic random field in three-dimensional space (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2014a, 2014b, 2019).

In this paper, authors propose modeling the random component within the three-dimensional domain using spectral decomposition (Vyzhva, 2003, 2011) in combination with a pentamodel type correlation function.

***Statistical simulation of chalk density data at the Rivne NPP.*** In this study, statistical simulation of chalk density data at the Rivne Nuclear Power Plant (RNPP) site was carried out for three depth levels: 28 m, 29 m, and 30 m from the surface. During the analysis of chalk density data at each level, it was found to be appropriate to separate the deterministic and random components of the field. The deterministic component was extracted using a curve approximation method to identify the underlying trend. The difference between the initial density map and the trend generally represents a realization of a homogeneous isotropic random field, which is a fundamental assumption in this approach.

The input data for each of the three levels can be expressed as realizations of a random field in 3D space: $\eta(x, y, z_i)$, $i = 1,2,3; z_1 = 28\text{m}, z_2 = 29\text{m}, z_3 = 30\text{m}$, where $\eta(x, y, z_i) = \eta_i(r, \theta, \varphi)$in spherical coordinates $(r, \theta, \varphi)$, and $i$ – level numbers. For each level, the trend $f_i(r, \theta, \varphi)$ and the random component $\xi_i(r, \theta, \varphi)$ (commonly modeled as a homogeneous isotropic random field in 3D space, also referred to as "noise") were identified as follows:

$$\eta_i(r, \theta, \varphi) = f_i(r, \theta, \varphi) + \xi_i(r, \theta, \varphi), \qquad i = 1,2,3.$$

Using statistical simulation, an extensive set of random field realizations $\xi_i(r, \theta, \varphi)$ $(i = 1,2,3)$ was generated for additional points within the three-dimensional observation domain. These simulated random components were superimposed onto the corresponding trend functions $f_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 1,2,3$ to obtain refined estimates of chalk density. As a result, the final stage of modeling provided a more detailed and continuous representation of chalk layer density within the study area at RNPP.

The adopted approach is based on statistical simulation of homogeneous isotropic random fields in 3D space using spectral decomposition (Vyzhva, 2003). This method enables accurate reconstruction of the random component of the data across the entire observation domain, thereby producing realistic representations of chalk density variations.

Prior to constructing the model and implementing the simulation procedure, a statistical analysis of the input data was performed. If the three-dimensional data distribution approximates a Gaussian law, the simulation procedure developed in several works (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013; Vyzhva, 2011) can be applied, in which realizations of

the random field are generated from sequences of standard normal random variables.

The statistical analysis of the chalk density data at RNPP, obtained from 29 wells, demonstrated that the histogram of the density distribution is approximately Gaussian (Fig. 2). The proposed simulation methodology also includes preliminary statistical processing to determine the key statistical characteristics of the data, including the correlation function model. When the Gaussian hypothesis for the data field is confirmed, the mathematical expectation and correlation function completely define the random field in 3D space, enabling the construction of an adequate statistical model based on spectral decomposition.

The principles of constructing statistical models and simulation procedures for pentamodel type correlation functions have been described in detail in work (Vyzhva et al., 2023) and are further discussed below.

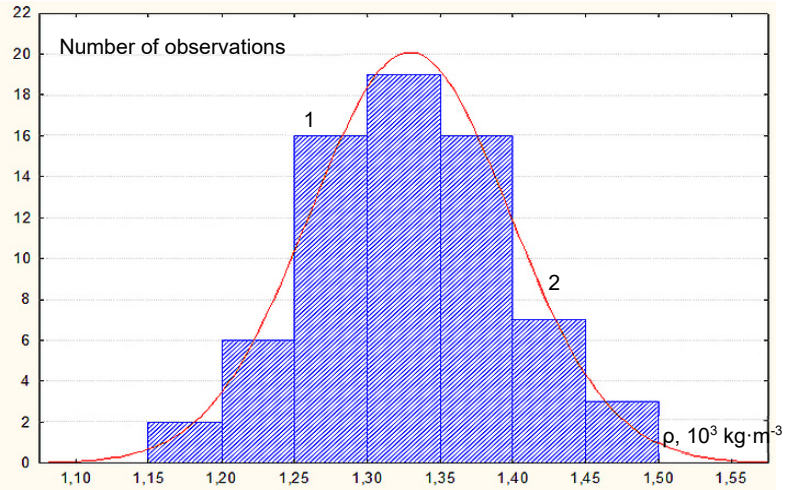



**Fig. 2. Histogram of the chalky strata density (averaged data for all years of observation):**
1 – the number of observations in a separate range of density, 2 – theoretical Gaussian curve

For the data correlation function $B(\rho)$, where ρ is the distance between the vectors $x, y \in R^3$ ($x = (r_1, \theta_1, \varphi_1), y = (r_2, \theta_2, \varphi_2)$), statistical models were selected to describe the density distribution of chalk strata within the three-dimensional observation domain. The correlation function was determined by comparing the root-mean-square approximation between the empirical and theoretical variograms derived from chalk density data.

As result, the input data was most adequately described using of 3 types of correlation functions: the Bessel correlation function (1) at the value of parameter $c = 5$, the Cauchy correlation function (2) at the value of parameter $a = 1$, the spherical correlation function (3) at the value of parameter $a \approx 1,25 * 10^{-2}$, the "cubic" correlation function (4) at the value of parameter $a \approx 1,25 * 10^{-2}$ and the pentamodel type correlation function (5) at the value of parameter $a \approx 2,4 * 10^{-2}$ (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2024).

The selection of these correlation functions was based on their ability to minimize the discrepancy between empirical and theoretical variograms, thereby ensuring the best statistical fit to the observed chalk density data. The Bessel and Cauchy functions demonstrated strong performance in modeling long-range spatial correlations, while the spherical and cubic functions effectively described medium-range structures. The pentamodel type correlation function has been explored to represent both local variations and larger scale spatial continuity.

$$B(\rho) = \sqrt{\frac{\pi}{2\,cr}}\, J_{\frac{1}{2}}(c\rho),\ c = 5, \qquad (1)$$

where $J_k(x)$ is the Bessel function of the first kind of order $k = 1/2$,

$$B(\rho) = \frac{a^4}{(a^2+\rho^2)^2},\ a = 1, \qquad (2)$$

$$B(\rho) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}\,\frac{\rho}{a} + \frac{1}{2}\left(\frac{\rho}{a}\right)^3, & \rho \le a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \qquad (3)$$

$$B(\rho) = \begin{cases} 1 - 7\left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \frac{35}{4}\left(\frac{\rho}{a}\right)^3 + \frac{7}{2}\left(\frac{\rho}{a}\right)^5 + \frac{3}{4}\left(\frac{\rho}{a}\right)^7, & \rho \le a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \qquad (4)$$

$$B(\rho) = \begin{cases} 1 - \frac{15}{8}\,\frac{\rho}{a} + \frac{5}{4}\left(\frac{\rho}{a}\right)^3 - \frac{3}{8}\left(\frac{\rho}{a}\right)^5, & \rho \le a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \qquad (5)$$

It is well established that a homogeneous isotropic random field is characterized by a variogram $\gamma(\rho)$. In this case, the variogram (Chiles, & Delfiner, 2012) is related to the correlation function $B(\rho)$ through the following expression:

$$\gamma(\rho) = B(0) - B(\rho). \qquad (6)$$

This relation reflects the dependence of the variance of the difference between random field values at two points on the distance between them. For $\rho = 0$, the variogram is zero, and as ρ increases, it grows, indicating a decrease in correlation between the random field values. Therefore, knowledge of $B(\rho)$ enables the construction of a variogram, which is essential for modeling the spatial structure of the data.

Thus, the variogram of a homogeneous isotropic random field is bounded by 2 $B(0)$. Equation (6) demonstrates that if the correlation function is known, the variogram can also be determined. Conversely, if the variogram of a homogeneous isotropic random field is bounded by a finite value, then $\gamma(\rho)$ follows the form given in equation (6). If the variogram has a sill, the value of $B(0)$ must be chosen equal to or greater than this sill. Therefore, knowing $\gamma(\rho)$ is equivalent to knowing $B(\rho)$.

The variograms of the three-dimensional chalk density data at the RNPP were constructed using the *R* software environment and the geoR package. The results correspond to the following correlation functions: Bessel (1) correlation function (the mean square approximation is 0,0008599), Cauchy (2) correlation function (the mean square approximation is 0,002816), spherical (3) correlation function (the mean square approximation is 0,000480) and

"cubic" correlation function (4) (the mean square approximation is 0,001360). Variograms plots were presented at Fig. 3(a), that according to Bessel type of correlation function, at Fig. 3(b), that according to Cauchy type of correlation function, at Fig. 3(c), that according to spherical type of correlation function for the random component of investigation 3D data.

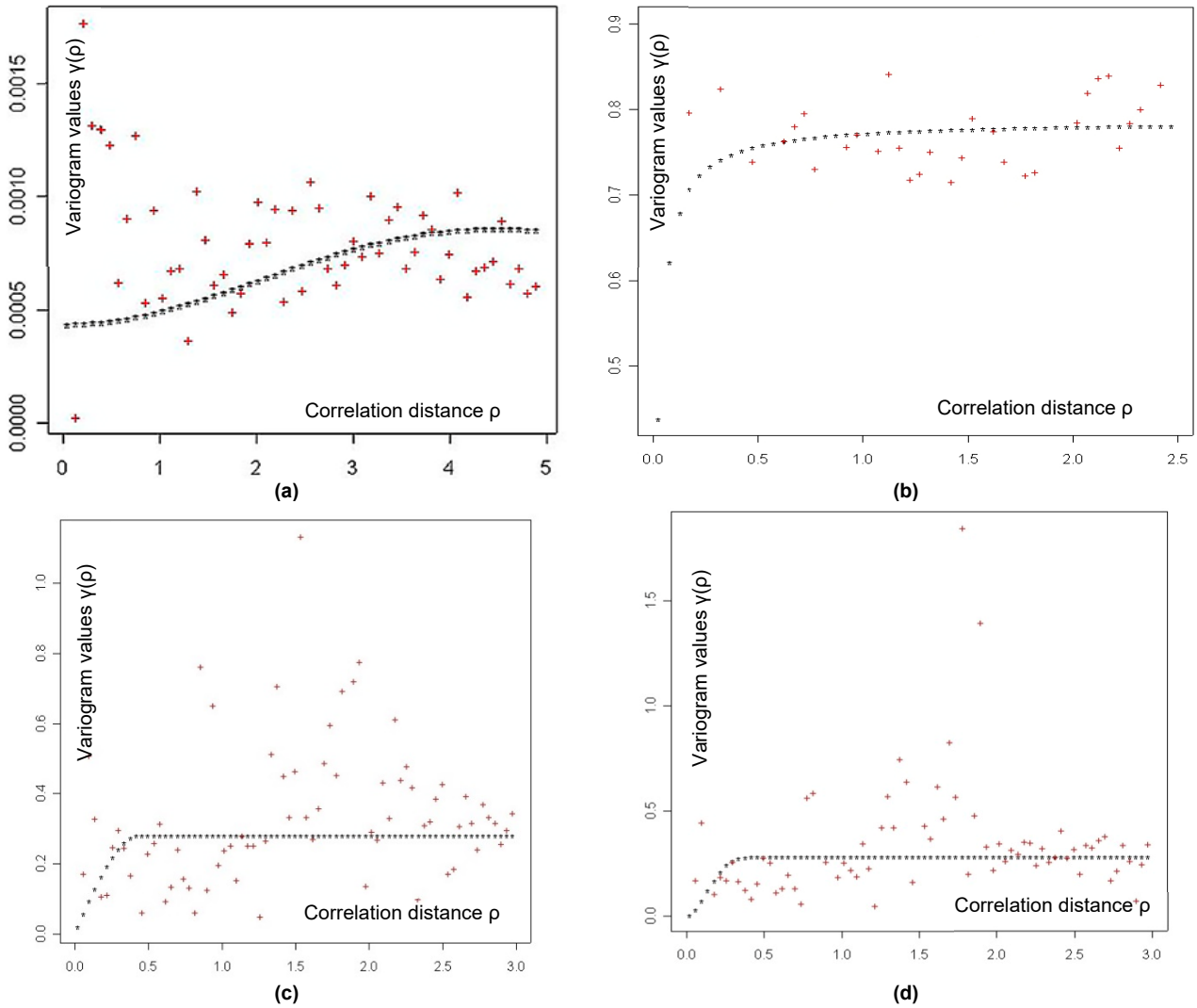



**Fig. 3. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms for input data of the chalky strata, that corresponding to the:**
(a) the Bessel (1) correlation function; (b) the Cauchy (2) correlation function;
(c) the spherical (3) correlation function; (d) the "cubic" (3) correlation function

The built empirical variogram (Fig. 4) of input chalky strata density 3D data at the Rivne NPP has the best approximation by theoretical variogram which is connected to the pentamodel type correlation function (5) with parameter $a \approx 2,4 * 10^{-2}$.

We have, that the constructed variogram of realizations in the studied territory (Fig. 5) has sufficiently adequate approximation by the theoretical variogram, which is associated with a pentamodel type correlation function (a mean square deviation is $9,35 * 10^{-4}$).

**Methods**

***Model, the spectral representation of homogeneous isotropic random fields in the 3D area, approximation theorem.*** Some theorems from the spectral theory of random fields now we present. We consider a real-valued homogeneous isotropic random field $\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$ in the three-dimensional area, here $\boldsymbol{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi}$ are spherical coordinates. It was previously proven (Yadrenko, 1983; Vyzhva, 2003; Vyzhva, 2011, p. 208) that square-mean continuous real-valued isotropic random field $\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$, that is in 3D Euclidean space $R^3$, admit the spectral decomposition by spherical harmonics.

The correlation function $\boldsymbol{B}(\boldsymbol{\rho})$ of the homogeneous isotropic random field $\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{r}, \boldsymbol{\theta}, \boldsymbol{\varphi})$ in three-dimensional area depends on distance $\boldsymbol{\rho}$ between the vectors $\boldsymbol{x}$ and $\boldsymbol{y}$, where $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y} \in \boldsymbol{R^3}$, these vectors are given as follows $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y} \in \boldsymbol{R^3}$, $\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{r_1}, \boldsymbol{\theta_1}, \boldsymbol{\varphi_1})$, $\boldsymbol{y} = (\boldsymbol{r_2}, \boldsymbol{\theta_2}, \boldsymbol{\varphi_2})$:

$$\boldsymbol{\rho} = \boldsymbol{r}\sqrt{\boldsymbol{2(1 - \cos\psi)}} = \boldsymbol{r}\sin(\boldsymbol{\psi}/2),$$

where $\boldsymbol{\cos\psi}$ is angular distance between vectors $\boldsymbol{x}$ and $\boldsymbol{y}$, where $\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y} \in \boldsymbol{R^3}$:

$$\boldsymbol{\cos\psi} = \boldsymbol{\cos\theta_1\cos\theta_2} + \boldsymbol{\sin\theta_1\sin\theta_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}.$$

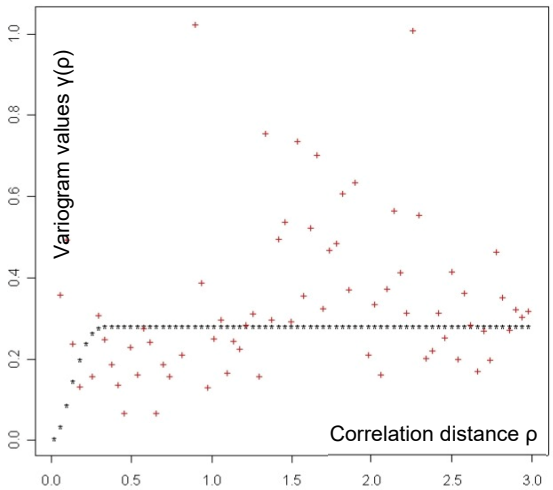



**Fig. 4. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms of input data arrays of chalk layer density, corresponding to pentamodel type correlation function ($a \approx 2,4 * 10^{-2}$)**

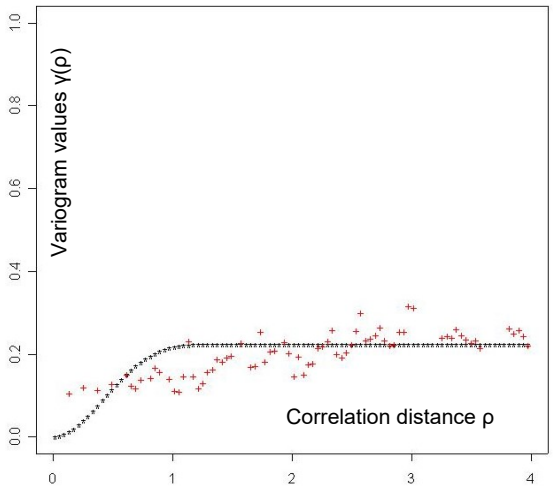



**Fig. 5. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms of simulated data arrays of chalk layer density, corresponding to pentamodel type correlation function ($a \approx 2,4 * 10^{-2}$)**

However, the spectral decomposition of considered random field is used to solve the problems of statistical modeling of realizations of a random field in three-dimensional space, where real-valued random variables occur. Let us present a theorem where the considered spectral distribution is applied.

Theorem 1. Let a mean square continuous realvalued homogeneous isotropic random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ is in 3D space with zero mean. Then this random field admits (Vyzhva, 2011, p. 210) such decomposition:

$$\xi(r,\theta,\varphi) = \\ = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{m} \tilde{c}_{m,l}\, P_m^l(\cos\theta)\, [\zeta_{m,\,1}^l(r)\cos l\varphi + \zeta_{m,\,2}^l(r)\sin l\varphi], \quad (7)$$

in the spectral decomposition (7) the symbols $P_m^l$, $m$, $\tilde{c}_{m,l}$ mean: $P_m^l$ is associated Legendre functions of degree $m$, $\tilde{c}_{m,l}$ are constants sequences and are calculated by the formula:

$$\tilde{c}_{m,l} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\nu_l}{\pi}\,\frac{(m-l)!}{(m+l)!}}\,(2m+1)\,,\ \nu_l = \begin{cases} 1, & l \neq 0, \\ 2, & l = 0; \end{cases} \quad (8)$$

random processes sequences $\{\zeta_{m,\,k}^l(r)\},\ k = 1,2$:

$$\zeta_{m,\,k}^l(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)}{(\lambda r)^{\frac{1}{2}}}\, Z_{m,k}^l(d\lambda)\,,$$

such that satisfying the following conditions:

1) $M\zeta_{m,\,k}^l(r) = 0$;

2) $M\zeta_{m,\,k}^l(r)\ \zeta_{m',\,k'}^{l'}(r) = \delta_l^{l'}\ \delta_m^{m'}\ \delta_k^{k'}\ b_m(r)$, (9)

in the conditions 1) and 2) of the form (9) $\delta_m^{m'}$ is Kronecker symbol, $b_m(r)$ are the spectral coefficients and $\{Z_m^l(.)\}$ is a sequence of orthogonal random measures on Borel subsets from the interval $[0,+\infty)$, i.e.

$$E\ Z_m^l(S_1)\ Z_{m'}^{l''}(S_2) = \delta_l^{l'}\ \delta_m^{m'}\ \Phi(S_1 \cap S_2)\,,$$

for any Borel subsets $S_1$ and $S_2$, here $\Phi(\lambda)$ is the bounded nondecreasing function so-called spectral function of random field $\xi(r,\theta,\varphi)$.

The spectral density of homogeneous isotropic random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ is determined by formula $f(\lambda) = d\Phi(\lambda)/d\lambda$ and also it is obtained by correlation function of this random field as integral:

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} \rho\lambda \sin(\lambda\rho)\, B(\rho)\, d\rho. \quad (10)$$

The spectral coefficients $\boldsymbol{b_m(r)}$ of random field $\boldsymbol{\xi(r,\theta,\varphi)}$ considered in three-dimensional space are defined by the spectral density $\boldsymbol{f(\lambda)}$ of this random field in the way:

$$b_m(r) = \int_0^{\infty} \frac{J^2_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)}{\lambda r} f(\lambda) d\lambda. \quad (11)$$

The statistical simulation of homogeneous isotropic random fields in the 3D space on the basis the spectral decomposition (7) coefficients (11) are considered further.

$$\xi_N(r,\theta,\varphi) = \sum_{m=0}^{N} \sum_{l=0}^{m} c_{ml}\, P_m^l(\cos\theta)\big[\zeta_{m,\,1}^l(r)\cos l\varphi + \\ + \zeta_{m,\,2}^l(r)\sin l\varphi\big],\ N \in \mathrm{N}. \quad (12)$$

Further we used mean square estimate from the paper (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2018). The following theorem is based on the results obtained in (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2018).

**Theorem 2**. Let a mean square continuous realvalued isotropic random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ on the sphere $S_3(r)$ in 3D space with zero mean ($r$ – radius of sphere). If $\mu_3 < +\infty$, then the mean square approximation of this random field by model (10) is such that

$$M\ [\xi(r,\theta,\varphi) - \xi_N(r,\theta,\varphi)]^2 \leq \frac{5\pi r^3}{2N^2}\mu_3, \quad (13)$$

where

$$\mu_3 = \int_0^{\infty} \lambda^3 \Phi\ (d\lambda)\ . \quad (14)$$

If we proposed, that r (radius of sphere) is not fixed, then the random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ is in 3D Euclidean space $R^3$.

Based on the model (12) and estimate (13), the algorithm for the statistical simulation of realizations of Gaussian homogeneous isotropic random fields $\xi(r,\theta,\varphi)$ in 3D Euclidean space $R^3$ was constructed. We have described this algorithm.

In this paper we constructed the algorithm for the statistical simulation of Gaussian homogeneous isotropic random fields on three-dimensional space with pentamodel type correlation function of the form (5).

The spectral density is obtained for pentamodel type correlation function (5) by means the formula (10) and then we have:

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi}\Big[\Big(\frac{5a}{2} + \frac{105}{a^3\lambda^4} - \frac{270}{a^5\lambda^6}\Big)\cos(\lambda a) - \Big(\frac{51}{a^2\lambda^3} - \\ - \frac{270}{a^4\lambda^5}\Big)\sin(\lambda a) + \frac{30}{a^3\lambda^4} - \frac{270}{a^5\lambda^6}\Big]. \quad (15)$$

The spectral coefficients, which correspond to the pentamodel type correlation function (4) of homogeneous isotropic random field $\xi(r,\theta,\varphi)$, are calculated by the formula (11) and we have:

$$b_m(r) = \frac{2}{\pi r}\int_0^{\infty} \frac{J^2_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)}{\lambda}\left[\left(\frac{5a}{2}+\frac{105}{a^3\lambda^4}-\frac{270}{a^5\lambda^6}\right)\cos(\lambda a) - \left(\frac{51}{a^2\lambda^3}-\frac{270}{a^4\lambda^5}\right)\sin(\lambda a)+\frac{30}{a^3\lambda^4}-\frac{270}{a^5\lambda^6}\right]d\lambda. \quad (16)$$

These spectral coefficients $b_m(r), m = 0,1,2,\dots N$ from (16) are calculated by Mathematica software for density chalky strata data.

**Results**

***The statistical simulation procedure of random field in 3D area with the pentamodel type correlation function.*** In this paper we generated the realizations of homogeneous isotropic random field in 3D area with the pentamodel type correlation function (5) at the values of parameter $a \approx 2,4 * 10^{-2}$. By the technique of spectral decomposition and finding of spectral coefficients the statistical simulation of density chalky strata data at the Rivne NPP object was performed.

By means of the abovementioned model (12), which is described in (Vyzhva et al., 2023), the procedure of numerical simulation the realizations of the 3D data field random component with the pentamodel type correlation function was conducted.

For the constructed model the value of number  is determined by the inequality, which is the estimate of the mean square approximation of random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ by partial sums $\xi(r,\theta,\varphi)$. This number N corresponds to the prescribed small number $\varepsilon$ (approximation accuracy). The mentioned inequality was obtained in theorem 2. Consequently, the estimate of the mean square approximation of the random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ with the pentamodel type correlation function (5) by the partial sums $\xi(r,\theta,\varphi)$ has the following representation:

$$M[\xi(r,\theta,\varphi)-\xi_N(r,\theta,\varphi)]^2 \le \frac{5\pi r^3}{2}\mu_3,$$

where

$$\mu_3 = \frac{2}{\pi}\int_0^K \left[\left(\frac{5a\lambda^3}{2}+\frac{105}{a^3\lambda}-\frac{270}{a^5\lambda^3}\right)\cos(\lambda a) - \left(\frac{51}{a^2}-\frac{270}{a^4\lambda^2}\right)\sin(\lambda a)+\frac{30}{a^3\lambda}-\frac{270}{a^5\lambda^3}\right]d\lambda, \quad K = \text{const}. \quad (17)$$

We define the dependence of the number $N$ on $r$ and $\varepsilon$ in the case of correlation function of the pentamodel type (5) in the form of an inequality:

$$N(r,\varepsilon) \ge \sqrt{\frac{5\pi r^3}{2\varepsilon}\mu_3}. \quad (18)$$

The statistical simulation procedure of Gaussian homogeneous isotropic random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ in 3D area with the pentamodel type correlation function (5) was built by means of the model (10) and the estimate (16). This random field is determined by its statistical characteristics: the mathematical expectation and the pentamodel type correlation function $B(\rho)$ of form (5) at the value of parameter $a \approx 2,4 * 10^{-2}$.

**Algorithm:**

1. Natural number $N$ (border of summation) is chosen according to necessary accuracy $\varepsilon > 0$ of approximation the model (12) mentioned below:

$$\frac{5\pi r^3}{2N^2}\mu_3 \le \varepsilon, \quad (19)$$

where

$$\mu_3 = \frac{2}{\pi}\int_0^K \left[\left(\frac{5a\lambda^3}{2}+\frac{105}{a^3\lambda}-\frac{270}{a^5\lambda^3}\right)\cos(\lambda a) - \left(\frac{51}{a^2}-\frac{270}{a^4\lambda^2}\right)\sin(\lambda a)+\frac{30}{a^3\lambda}-\frac{270}{a^5\lambda^3}\right]d\lambda, \quad K = \text{const}.$$

The spectral coefficients $b_m(r),\ m = 0,1,2,\dots N$ are calculated for the pentamodel type correlation function (5) as integral (16).

2. Simulate the sequences of independent Gaussian normal random variables:

$$\{\varsigma^l_{m,k}(r)\},$$
$$k = 1,\ 2;\ m = 0,\ 1,\ 2,\dots N;\ l = 1,\dots,\ m;$$

that satisfying the conditions (9) with spectral coefficients (16).

3. Calculate the realization of the stochastic random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ by formula (12) in given point $(r_i,\theta_j,\varphi_p)$, $i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,G;\ p = 1,2,\dots,P$ in the 3D observations area by means of substituting in it values numbers $N$ and sequences of Gaussian random variables from the previous items 1, 2 and 3.

4. Check whether the realization of the random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ generated in step 4 fits the data by testing the corresponding statistical characteristics (distribution and correlation function).

By means of this algorithm the statistical simulation of realizations of the Gaussian isotropic random fields $\xi(r,\theta,\varphi)$ with pentamodel type correlation function can be done.

Note that the procedure can be applied to random fields with different type of distribution. Then the sequences of random variables $\{\zeta_{k,i}(r), i = 1,2; k = 0,1,2,\dots,N(r,\varepsilon)\}$ must be distributed according to the appropriate distribution type.

The original Spectr software, developed in Python, was designed to generate realizations of random fields in a three-dimensional domain based on the results of statistical data processing and the described simulation algorithm. In this software, the pentamodel type correlation function (5) with the parameter $a \approx 2,4 * 10^{-2}$ was applied. Using Spectr, realizations of the random field $\xi(r,\theta,\varphi)$ were computed for 100 points at each of the three observation levels $(r_i,\theta_j,\varphi_p)$, $i = 1,2,\dots,I;\ j = 1,2,\dots,G;\ p = 1,2,\dots,P$ within the three-dimensional study area. Based on these realizations, a statistical estimate of the correlation function was obtained. This estimate was compared with the predefined pentamodel type correlation function (5), which allowed for a statistical assessment of the adequacy of the generated realizations. The constructed variogram of these realizations for the study area (Fig. 6) demonstrated a close fit to the theoretical variogram associated with the pentamodel-type correlation function. These results confirm that the selected statistical model for the chalk density data at the RNPP site is sufficiently accurate. Furthermore, the Spectr software developed for generating such random field realizations ensures high precision in the modeling process.

The results obtained using additional modeling procedures are presented in Fig. 6. Fig. 6(a) shows an example of a chalk density map constructed from well observation data (averaged over several years for 29 wells at a depth of 28 m) using the Surfer software. However, due to the limited number of measurements, the accuracy of such a map is insufficient to provide a reliable characterization of the chalk strata condition.

Fig. 6(b) illustrates the contours of equal chalk density values generated based on simulation results, which include the anchor borehole data obtained by calculating the spectral coefficients of the pentamodel type correlation function. Furthermore, the inclusion of 100 simulated values in the intervals between observation points provides a more accurate approximation of the density distribution. This improvement allows for more informed decision-making regarding the state of the chalk strata and helps identify locations that require testing or additional research.

Similarly, the results of the simulation procedure for borehole observation data (averaged over several years for 29 boreholes at a depth of 29 m) are presented in Fig. 7. Fig. 7(a) displays a chalk density map created from observation data using the Surfer software. Fig. 7(b) shows contours of equal density values derived from the simulation

data, which also incorporate the anchor borehole values. The integration of 100 simulated values between the observation points improves the approximation quality, thus enabling a more accurate assessment of the chalk strata condition and supporting better-informed decisions for further investigations.

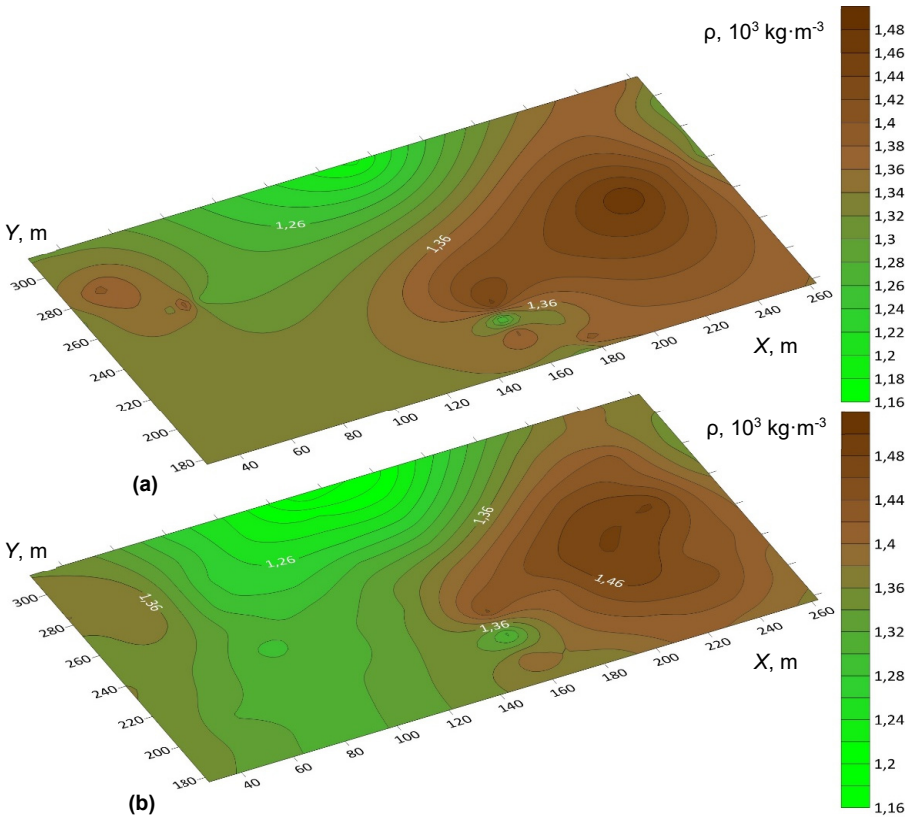



**Fig. 6. The distribution of chalky strata density is on the industrial area of Rivne nuclear power plant at a depth of 28 m. from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational wells over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure wells by spectral coefficients the pentamodel type**

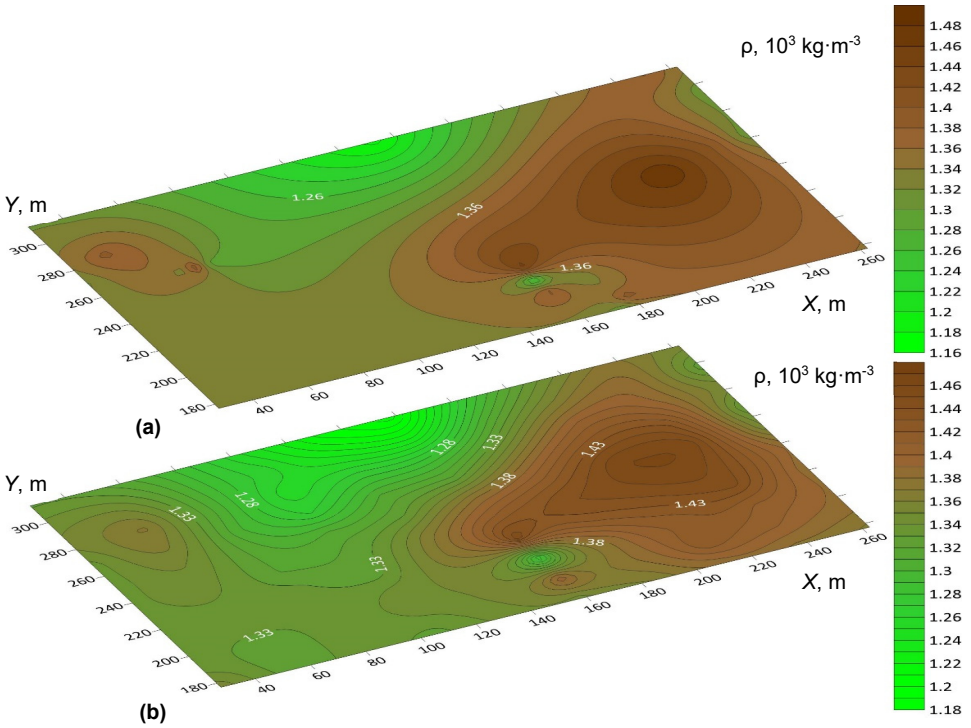



**Fig. 7. The distribution of chalky strata density is on the Rivne NPP object at a depth of 29 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational wells over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure wells by spectral coefficients the pentamodel type**

Finally, the results obtained using the simulation procedure for the observation wells (averaged data collected over several years for 29 wells at a depth of 30 m) are presented in Fig. 8. Fig. 8(a) shows an example of a chalk density map constructed from the observational data using the Surfer software. Fig. 8(b) displays contours of equal chalk density values derived from the simulation results, which include anchor well data. Furthermore, the addition of 100 simulated values in the intervals between the observation points provides a more reliable approximation, enabling a more accurate assessment of the chalk strata condition and supporting informed decision-making.

A statistical evaluation of the correlation function was performed for the simulated realizations of the chalk density distribution within the 3D observation domain at the RNPP site. This estimate was compared with the theoretical pentamodel type correlation function (5) with the parameter $a \approx 2,4 * 10^{-2}$, confirming the adequacy of the realizations through statistical analysis. The constructed variogram of these realizations for the study area (Fig. 5) closely matched the theoretical variogram associated with the pentamodel type correlation function. These results demonstrate that the selected correlation model for the random component of the data is sufficiently accurate and that the developed Spectr software provides reliable performance for generating random field realizations.

The pentamodel type correlation function provided the highest degree of flexibility, allowing the representation of both local variations and broader-scale spatial continuity.

The simulation process effectively supplemented sparse observational data, improving the resolution of chalk density distribution and the accuracy of geological interpretation. Statistical analysis confirmed the adequacy of the proposed model and its applicability for geophysical monitoring of potentially hazardous sites.

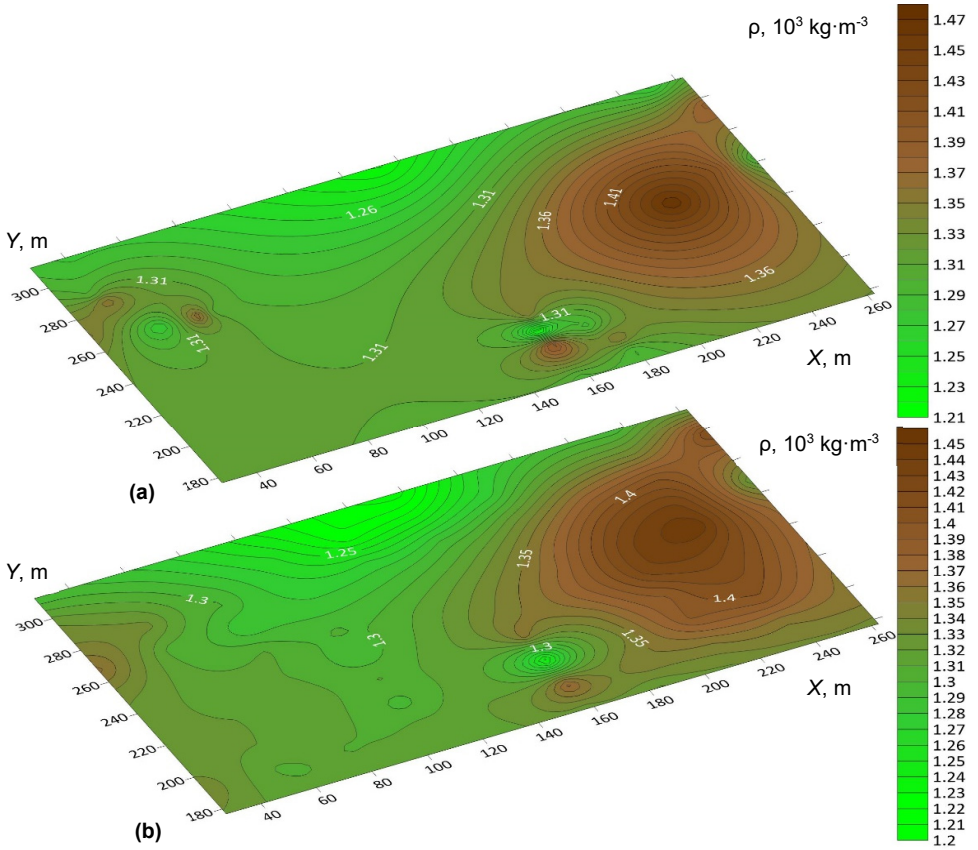



**Fig. 8. The distribution of chalky strata density is on the industrial area of Rivne nuclear power plant at a depth of 30 m. from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational wells over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure wells by spectral coefficients the pentamodel type**

## Discussion and conclusions

Theoretical foundations, methodology, and procedures for statistical modeling of random fields in a three-dimensional domain using a pentamodel type correlation function, which is optimal in the mean-square sense, significantly enhance the efficiency of monitoring observations in areas of potentially hazardous facilities. This approach enables the interpolation and extrapolation of parameter values between and beyond observation grid nodes, providing a more accurate description of the three-dimensional density distribution of chalk strata within the industrial zone of the Rivne Nuclear Power Plant (RNPP).

The results presented in Vyzhva, Demidov, & and Vyzhva (2020) demonstrate that the accuracy of statistical modeling of Gaussian isotropic random field realizations using a spherical correlation function is comparable to that achieved with a pentamodel correlation function ($4.8 * 10^{-4}$). Thus, although the statistical modeling method with pentamodel-type correlation functions ensures the required accuracy, the comparable results justify the use of the spherical model as an alternative without significant loss of precision.

Previous studies by the authors (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013, 2014a, 2014b, 2019, 2020, 2023, 2024) have shown that the proposed method can be effectively applied to detect anomalous zones in the analysis of geophysical parameters within a three-dimensional domain.

Beyond its value for geophysical investigations and environmental monitoring tasks, this approach has proven effective in identifying anomalous regions in various geological datasets, including gravimetry and

magnetometry. Furthermore, statistical modeling based on random functions offers broad potential for applications in related Earth sciences disciplines, such as environmental magnetism (Menshov et al., 2015).

**Authors' contribution:** Zoya Vyzhva – problem formulation, development of analytical expressions for the model, selection of scientific novelty, formal analysis, methodology, review and editing; Andriy Vyzhva – statistical modeling algorithm development, editing; Vsevolod Demidov – review of publications, data processing, conclusions, refinement and editing; Tetiana Shovkoplias – improved of analytical expressions for the model.

**References**


Chiles, J. P., Aug, C., Guillen, A., & Lees, T. (2005). Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: The potential-field method. In R. Dimitrakopoulos (Ed.), *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning: Uncertainty Management Models* (Spectrum Series 14, pp. 329–336). The Australasian Institute of Mining and Metallurgy.

Chiles, J. P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Emery, X., & Lantuejoul, C. (2006). TBSIM: A computer program for conditional simulation of three-dimensional Gaussian random fields via the turning bands method. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1615–1628. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.03.001

Guyon, X. (1993). *Champs Aléatoires sur un Réseau. Modélisations, Statistique et Applications. Techniques Stochastiques*. Masson.

Mantoglov, A., & Wilson, J. L. (1981). *Simulation of random fields with turning bands method*. MIT Ralph M. Parsons Lab. Hydrol. and Water Syst. Rept, 264.

Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.

Tolosana-Delgado, R., & Mueller, U. (2021). Geostatistics for Compositional Data with R. (Chapter: Compositional Direct Sampling Simulation). In *Geostatistics for Compositional Data with R* (pp. 187–207). SpringerLink. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-82568-3_10

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2019, May 13–16). *About statistical simulation algorithm of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example*. 18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Kyiv, Ukraine.

Vyzhva, S. A., Deineko, S. I., Demidov, V. K., & Astashkina, O. A. (2010). Dynamic geologic-geophysical model of chalky layer and dispersible soils on territory of the RNPP site. *Geoinformatics, 9th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.

Vyzhva, Z. O. (2021). *The statistical modeling in geology*. PPC "Kyiv University" [in Ukrainian]. [Вижва, З. О. (2021). *Статистичне моделювання в геології*. ВПЦ "Київський університет"]. https://mechmat.knu.ua/wpcontent/uploads/2022/12/posibnyk_vyzhva_z.pdf

Vyzhva, Z. O. (2011). *The statistical modeling of random processes and fields*. Obrii [in Ukrainian]. [Вижва, З. О. (2011). *Статистичне моделювання випадкових процесів та полів*. Обрії].

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2014b). Monte Carlo method and Cauchy model identifying chalk layer density on Ryvne NPP. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *2*(65), 62–67 [in Ukrainian]. [Вижва, З. О., Демидов, В. К., & Вижва, А. С. (2014b). Дослідження густини крейдяної товщі методом Монте-Карло на проммайданчику Рівненської АЕС із застосуванням моделі Коші. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(65), 62–67].

Vyzhva, Z. O. (2003). About Approximation of 3D Random Fields and Statistical Simulation. *Random Operator and Stochastic Equation*, 4(3), 255–266.

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2014a). The investigation of chalk layer density on Rivne NPP industrial area territory by Monte Carlo method using 3D models. *Geoinformatics*, 3(51), 47–56 [in Ukrainian]. [Вижва, З. О., Демидов, В. К., & Вижва, А. С. (2014a). Дослідження густини крейдяної товщі методом Монте-Карло на проммайданчику Рівненської АЕС із застосуванням 3D-моделей. *Геоінформатика*, 3(51), 47–56].

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2013). *About methods of 3D dataset statistical simulation on Rivne NPP example*. XII International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects.

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2018). About statistical simulation methods of random fields on the sphere by the aircraft magnetometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(82), 107–113.

Vyzhva, Z., Demidov, V., & Vyzhva, A. (2020). The statistical simulation of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(91), 85–93. https://doi.org/10.17721/1728-2713.91.12

Vyzhva, Z., Demidov, V., & Vyzhva, A. (2024). The statistical simulation of dataset in 3D area with "cubic" correlation function on example Rivne NPP geophysical monitoring. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *3*(106), 90–98. https://doi.org/0.17721/1728-2713.106.12

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., Shovkoplias, T. V., & Vyzhva, A. S. (2023). The algorithm for statistical modelling in 3D by pentamodel of variogram using the example on Rivne NPP data. *XVIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*.

Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics* (3rd ed.). Springer-Verlag.

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons.

Yadrenko, M. Y. (1983). *Spectral theory of random fields*. Optimization Software Inc., Publications Division.


**Отримано редакцією журналу / Received: 29.08.25**
**Прорецензовано / Revised: 31.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Зоя ВИЖВА[1], д-р фіз.-мат. наук, проф.**
**ORCID ID: 0000-0002-6338-3892**
**e-mail: zoya_vyzhva@ukr.net**

**Всеволод ДЕМИДОВ[1], канд. фіз.-мат. наук, доц.**
**ORCID ID: 0009-0003-9472-6530**
**e-mail: demidov@knu.ua**

**Андрій ВИЖВА[2], канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.**
**ORCID ID: 0009-0003-6699-5848**
**e-mail: motomustanger@ukr.net**

**Тетяна ШОВКОПЛЯС[1], канд. фіз.-мат. наук, асист.**
**ORCID ID: 0009-0004-8991-0285**
**e-mail: 1zagmat.tetyana1@knu.ua**

**[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна**
**[2]ДП "Науканафтогаз", Київ, Україна**

## СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ В 3D ОБЛАСТІ З ВАРІОГРАМОЮ ТИПУ ПЕНТАМОДЕЛЬ ДЛЯ ГЕОФІЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ РІВНЕНСЬКОЇ АЕС

***В с т у п .*** ***Представлено розроблену модель та алгоритм статистичного моделювання даних у тривимірній області з використанням варіограм пентамодельного типу, що забезпечують оптимальне наближення в середньому квадратичному значенні. Як приклад продемонстровано застосування запропонованого методу для доповнення результатів геофізичних досліджень карстово-суфозійних процесів при моніторингу щільності крейдяної товщі на території Рівненської АЕС. На майданчику розміщення Рівненської АЕС було виконано комплекс геофізичних робіт. Серед проведених спостережень найбільший інтерес становлять радіоізотопні дослідження щільності та вологості ґрунтів у зоні існуючих споруд. При цьому постало завдання заповнення даних, отриманих у ході контролю зміни щільності крейдяної товщі радіоізотопними методами мережі спостережень, що включала 29 свердловин.***

***Для вирішення цього завдання застосовано метод статистичного моделювання з використанням варіограми пентамодельного типу, що дає змогу відтворювати випадкове поле досліджуваного об'єкта в тривимірній області в довільних точках спостереження.***

***М е т о д и .*** ***За допомогою спектрального розкладу випадкових полів у тривимірному просторі побудовано статистичну модель розподілу усередненої щільності крейдяної товщі в межах досліджуваної території. Розроблений алгоритм забезпечує генерацію реалізацій випадкових полів із заданими кореляційними властивостями та просторовою дискретизацією, що відповідає вимогам до точності моделювання.***

**Результати.** *Сформульовано та реалізовано алгоритм статистичного моделювання випадкових полів з кореляційною функцією пентамодельного типу. На основі розробленого програмного забезпечення отримано додаткові змодельовані реалізації випадкової складової щільності крейдяної товщі на регулярній сітці спостережень з необхідним ступенем деталізації. Проведено порівняння набору кореляційних функцій для одного набору даних у середньому квадратичному значенні. Проведено статистичний аналіз отриманих результатів чисельного моделювання, включаючи перевірку їх адекватності вихідним даним спостережень та оцінку збіжності полів, що моделюються.*

**Висновки.** *Запропонований метод статистичного моделювання випадкових полів з кореляційними функціями пентамодельного типу дає змогу заповнювати відсутні даних з високим ступенем достовірності та може бути ефективно застосований при вирішенні завдань геофізичного моніторингу та інтерпретації просторово розподілених параметрів геологічного середовища.*

**Ключові слова:** *статистичне моделювання, кореляційна функція типу пентамодель, спектральний розклад, кондиційність карт, Рівненська АЕС.*

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

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

UDC 005.631.11:004
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.13

Vitaliy ZATSERKOVNYI[1], DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Victor VOROKH[1], PhD Student
ORCID ID: 0009-0005-0112-8422
e-mail: fainkucha@gmail.com

Olga HLOBA[1], Student
ORCID ID: 0009-0003-4923-3374
e-mail: olgagloba73@knu.ua

Olesia LIASHCHENKO[1], PhD (Philol.), Assoc. Prof.,
ORCID ID: 0000-0003-4649-3667
e-mail: Lyashchenko1981@ukr.net

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

# APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS AND REMOTE SENSING DATA FOR CROP YIELD FORECASTING

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником Олександром МЕНЬШОВИМ)*

**Background.** ***Forecasting agricultural crop yields has always been a complex task, particularly in the context of climate instability and increasing pressure on resources. Given the limitations of classical mathematical models in such a complex field as agricultural analytics, data-driven approaches and machine learning-based methods are becoming increasingly important. The combination of satellite imagery, agrochemical soil analysis, and artificial intelligence algorithms is particularly promising for building flexible and accurate forecasts.***

**Methods.** ***This study analyzes two agricultural fields located in different regions of Ukraine with varying natural conditions. A comprehensive dataset was collected, including topographic features (elevation, slope, topographic wetness index), spectral indices from Sentinel-2A and Landsat 8 satellites (specifically, NDMI and GNDVI), and soil chemical composition. Correlation analysis was used to identify which indicators are most closely associated with yield levels. Yield prediction models were developed using Random Forest and Gradient Boosting algorithms, adapted to field subplots of 5 ha and 1 ha.***

**Results.** ***The analysis revealed that vegetation condition and crop water balance (NDMI, GNDVI) are the most effective indicators in explaining yield variability. Meanwhile, surface temperature showed a clearly negative impact, suggesting potential heat stress during the grain filling periods. Gradient Boosting demonstrated particularly high sensitivity to spatial detail, reaching a prediction accuracy of $R^2$=0.801 at the 1 ha grid level. In contrast, Random Forest proved to be a robust method with lower sensitivity to data scale.***

**Conclusions.** ***The study demonstrates that combining satellite imagery, soil analysis results, and machine learning methods can significantly improve the accuracy of crop yield prediction. The developed models incorporate vegetation indices along with factors describing crop growing conditions. A comparison of various algorithms was also conducted under different levels of spatial detail. The results indicate that the proposed approach can be effectively applied in precision agriculture, particularly for agronomic planning and crop monitoring.***

**Keywords:** ***artificial intelligence (AI), machine learning (ML), remote sensing (RS), random forest (RF), gradient boosting (GB), normalized difference moisture index (NDMI), green normalized difference vegetation index (GNDVI), precision agriculture (PA), Correlation Analysis (CA).***

## Background

Predicting potential crop yields, selecting suitable crops, assessing their profitability, and minimizing associated risks have been fundamental challenges in agriculture since its inception.

Forecasting is a crucial component of modern information technologies and decision support systems, applied both in the design of complex systems (such as energy, agrotechnical, and information and communication systems) and in their management under uncertainty. Subsequent agricultural planning involves developing crop rotation systems, pasture management plans, soil cultivation methods, fertilizer application strategies, and packages of agrotechnologies adapted to different intensification levels (Semeniaka et al., 2024).

Currently, preference is given to advanced technologies, particularly precision agriculture systems for crop management, which are based on satellite and computer technologies (Makedonska, Zatserkovnyi, & Tustanovska, 2018). Therefore, yield assessment and prediction can be approached in various ways. The application of traditional classical mathematical modeling approaches (such as systems of econometric equations, adaptive models, methods of nonlinear dynamics, etc.) does not always allow for obtaining adequate results, as they may lead to problems that cannot be solved by known methods or algorithms. Consequently, researching new classes of mathematical models is a relevant and promising task. In this context, artificial intelligence and machine learning algorithms present one of the most effective approaches. It is an approach in which historical data or examples are utilized to initially develop and subsequently improve the predictive model.

In Ukrainian studies, the effectiveness of indices like NDVI and NDMI as key yield predictors has been demonstrated (Kravchenko, & Danylenko, 2022; Ivanenko, & Sakhno, 2021). Their use enables the timely identification

© Zatserkovny Vitaliy, Vorokh Victor, Hloba Olga, Liashchenko Olesia, Siuiva Iryna, 2025

ISSN 1728-3817

of drought-affected areas that impact crop yields. Similar conclusions are supported by international research as well. For instance, a model based on deep Gaussian processes achieved high accuracy in maize yield prediction (You et al., 2017), while the integration of NDVI, surface temperature, and field parameters have been justified as a foundational approach to predictive analytics (Lobell et al., 2015).

Machine learning (ML) approaches are applied across diverse domains-from retail (for analyzing customer behavior) (Ayodele, 2010) to agriculture (McQueen et al., 1995) and even telecommunications usage prediction (Witten et al., 2016). ML is a branch of artificial intelligence focused on developing algorithms that allow computers to learn from data without explicit programming. Within ML, computers "learn" to make predictions, recognize patterns, and support decision-making based on input data. ML is a valuable tool for determining which crops to cultivate and what agricultural operations to perform during the growing season. Under the pressures of global climate change and economic constraints, highly accurate crop yield forecasting becomes critical to effective farming. However, natural, biological, and technological factors exert complex and sometimes opposing influences on prediction outcomes, at times leading to forecast errors exceeding 15 %.

Depending on the research objective, ML models can be either descriptive or predictive. Descriptive models are used to gain insight from data and explain past events, while predictive models are intended to forecast future outcomes (Alpaydin, 2010). It is important to recognize that forecasting in precision agriculture is not a trivial task, as it depends on multiple datasets, including climatic conditions, weather, soil properties, fertilizer use, and seed variety (Xu et al., 2019).

ML, as a branch of AI, emphasizes learning and offers a practical approach for improving predictions, discovering patterns and correlations, and extracting knowledge from existing datasets. The application of ML algorithms to the analysis of these high-dimensional agricultural data opens new possibilities for enhancing forecast accuracy and optimizing agrotechnical operations.

Among spatial modeling approaches, Gradient Boosting and Random Forest methods have proven to be the most effective (Gnatienko, Sorochynskyi, & Derkach, 2024; Shin, Kim, & Lee, 2021), showing high resilience across varying spatial scales and adaptability to specific field conditions. Other researchers have employed multimodal approaches that integrate drone and satellite imagery (Maimaitijiang et al., 2020), or deep neural networks, which improved forecast accuracy by 10–15 % (Kuwata, & Shibasaki, 2015; Melnyk, 2023). The use of LSTM architectures has also shown promise in regional yield assessments (Melnyk, 2023), while a satellite image-based approach to crop classification in Ukraine achieved over 88 % accuracy (Kussul et al., 2017).

Precision agriculture includes Variable Rate Seeding, which allows for the site-specific adjustment of seeding and fertilization rates based on soil and field properties (Samko et al., 2025). Indeed, the correlation analysis of collected data in yield forecasting is a complex task requiring processing numerous parameters and precisely identifying the key factors that determine final outcomes. Crop yield is also significantly influenced by the topographical features of the site – such as elevation and slope, which determine the distribution of surface and groundwater, as well as local water balance and erosion conditions.

**Methods**

This study employs two machine learning methods: Random Forest and Gradient Boosting.

Random Forest (RF) is an ensemble method that constructs numerous individual decision trees, each trained on random subsets of features and data samples. The method operates as follows: for each tree, a random subset of the data (with replacement) and a subset of features are selected; the predictions of all trees are averaged (for regression) or determined by majority vote (for classification). Key advantages of this method include resistance to overfitting due to the result averaging, robustness when dealing with noisy or non-representative data, automatic handling of missing values, insensitivity to feature scaling, and the ability to assess the importance of individual features, thereby enhancing model interpretability (Breiman, 2001).

Gradient Boosting is a sequential ensemble technique where each new tree is trained to minimize the errors of the previous one by optimizing a loss function using gradient descent. Initially, a simple tree (e.g., with a depth of 1–3) is built, and at each step, a new tree is added that is trained on the residual errors of the model. This method achieves high predictive accuracy even on complex datasets and offers flexibility through hyperparameter tuning (learning rate, tree depth, number of iterations), making it effective for yield prediction tasks (Friedman, 2001). Crop condition, assessed using spectral indices (calculated from Sentinel-2A and Landsat 8 satellite imagery) and band combinations, reflects the growth stage and physiological status of crops in various zones of the field. Agronomic soil characteristics – such as the chemical composition of macro- and micronutrients, pH, and organic matter create the foundational conditions for plant nutrition. The integration of these three data groups provides a comprehensive overview of productivity factors and can serve as a basis for accurate yield forecasting and the optimization of differentiated agronomic measures (Table 1).

Field 1, with an area exceeding 309.6 hectares, is located in Varva settlement of the Pryluky district, Chernihiv region, near the village of Berizka (Fig. 1). The soils in the study area are predominantly typical low humus chernozems and degraded light loam chernozems, which require particular attention to the preservation of their fertility and structure. The terrain within the study area is heterogeneous, with elevation differences of up to 20 meters and gentle slopes with inclinations up to 4° (Zatserkovnyi et al., 2025a). The levels of potassium and phosphorus are moderately high. In terms of quality, the soils are average, with an average organic matter content of 3.7 %. The field is managed by the agricultural company "Kernel". The average corn grain yield on this field ranges from 7 to 9 t/ha.

Field 2, covering 119.2 hectares, is located near the village of Lysivtsi in the Tovste community of the Chortkiv district, Ternopil region (Fig. 2), and is cultivated by the scientific-production agri-enterprise "El Gaucho". The field mainly consists of podzolized chernozems, primarily formed on loess soils. The slope gradient ranges from 1° to 5°. The soils are of high quality (scoring between 70 and 80 points), with an estimated organic matter content of approximately 5.5 %. The potassium and phosphorus levels are high, and the soil pH is moderately alkaline.

To reduce the dimensionality of the input dataset and improve prediction efficiency, a preliminary analysis of the collected data is conducted to select the most informative parameters. One of the main methods used for this purpose is correlation analysis, which helps establish statistical relationships between different indicators. The correlation matrix reflects the degree of linear association between pairs of variables and is based on the Pearson correlation coefficient, which is calculated using formula (1).

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}} \quad (1)$$

where $x_i$ and $y_i$ – are individual observations (values) for the two variables X and Y, respectively. $\bar{x}$ and $\bar{y}$ – are the mean

values of all observations for the variables X and Y (Pearson correlation coefficient, n.d.).

*Table 1*

**List of attributes to be used for calculations and modeling**

| Parameter | Description | Acronym |
|---|---|---|
| **Relief** | | |
| Elevation | Absolute height above sea level, m. | El |
| Slope gradient | Surface slope angle (°) | Sl |
| Topographic Position Index | Difference between the elevation of a point and the mean elevation of its surrounding area | TPI |
| Topographic Wetness Index | The ratio of the specific catchment area to the tangent of the slope angle, used to assess the potential for moisture accumulation | TWI |
| **Soil** | | |
| Exchangeable calcium. | Calcium concentration in soil exchangeable cations, mg/kg | Ca |
| Exchangeable potassium | Concentration of potassium in soil exchangeable cations, mg/kg. | K |
| Mobile phosphorus | Concentration of available phosphorus in soil, mg/kg | P |
| Exchangeable sodium | Concentration of sodium in soil exchangeable cations, mg/kg | Na |
| Exchangeable magnesium | Concentration of magnesium in soil exchangeable cations, mg/kg | Mg |
| Organic matter | Content of organic matter in soil, % | Org_M |
| pH (KCl) | Soil acidity extracted with KCl solution, pH units | pH_KCl |
| **Crop condition** | | |
| Green vegetation index | Vegetation activity indicator, (NIR – GREEN) / (NIR + GREEN) | GNDVI |
| Surface temperature | Temperature of the land surface or vegetation derived from the satellite thermal channel (°C) | LST |
| Moisture index | Indicator of leaf moisture content in plants, (NIR – SWIR) / (NIR + SWIR) | NDMI |




**Fig. 1. Location of the study field No. 1 (authors' own elaboration based on OpenStreetMap data)**

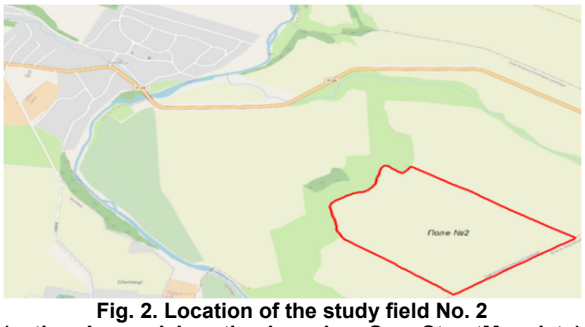



**Fig. 2. Location of the study field No. 2 (authors' own elaboration based on OpenStreetMap data)**

## Results

In the case of the study field No. 1, the correlation matrix (Fig. 3) shows the strongest positive relationship between yield and GNDVI (r = 0.78), as well as between yield and NDMI (r = 0.77), highlighting the significant role of water balance and vegetation status in yield formation. During the active grain filling phase, these indices are directly related to the crop condition, which explains the high correlation coefficients. The TWI index shows a moderate positive correlation (r = 0.36). Soil water availability is a key factor; however, TWI is not a direct indicator of moisture but rather reflects the potential for its accumulation (depending on topography, drainage, etc.). Therefore, even if a location has the potential to retain water, it does not necessarily mean that moisture will actually be available, as this depends on rainfall, evaporation, and other factors.

Potassium (r = –0.49) shows a moderate negative correlation with yield. The surface temperature of the corn crops grown for grain (r = –0.59) indicates a strong negative correlation. Higher surface temperatures of crops often signal water stress. When a plant experiences water deficiency, its leaf and surface temperature rise. Thus, this strong negative relationship is entirely expected. Exchangeable magnesium, organic matter, and slope steepness indicators show the weakest correlations with yield. High potassium values may result from uneven fertilizer distribution or poor availability due to other factors, meaning that potassium is present but not effectively utilized. As a result, an inverse relationship may be observed: a high amount of potassium in certain areas does not indicate better yields and may, in fact, indicate the opposite.

Correlation matrix of the study field No. 2 (Fig. 4): The strongest positive correlation with yield is observed for NDMI (r = 0.50) and GNDVI (r = 0.52).

The terrain, specifically slope steepness (r = –0.45), shows a noticeable correlation with yield. This likely indicates that field No. 2 has more pronounced topographic contrasts, which have a stronger impact on yield compared to field No. 1. The surface temperature of the crops during the full grain filling period is negatively correlated with corn yield (r = –0.41), which is a typical result for corn under high-temperature conditions during this critical growth phase. Unlike in the previous field, magnesium shows a strong positive correlation here (r = 0.52). The weakest correlations with grain corn yield are observed for exchangeable sodium and mobile phosphorus.

The analysis of the correlation results revealed that mobile phosphorus, as well as exchangeable magnesium and sodium, exhibit weak correlations with corn yield in the study fields No. 1 or No. 2. Specifically, the correlation coefficients for these indicators fall within low ranges, indicating their limited explanatory power in the context of the selected dataset. According to standard statistical analysis procedures, variables showing weak correlation would typically be excluded from further modeling or forecasting schemes to improve accuracy. However, considering that these parameters are fundamental in agrochemical soil analysis and are traditionally used to assess yield potential, the decision was made to retain them in the study. It is likely that the weak correlation is due to the limited data volume or data quality. This suggests that with

a more representative dataset, collected over broader spatial or temporal scales, these indicators may demonstrate a more significant influence on corn yield.

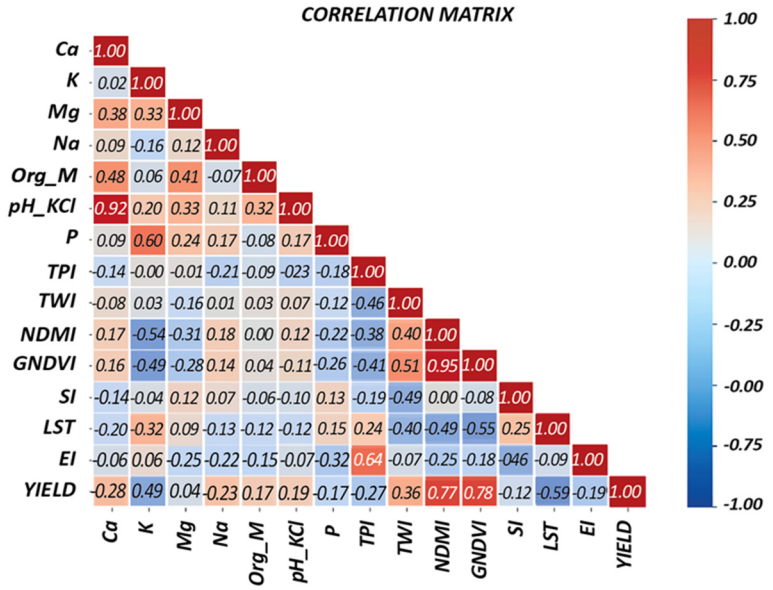



***Fig. 3. Matrix of linear correlation coefficients for the study field No. 1 (authors' own elaboration)***

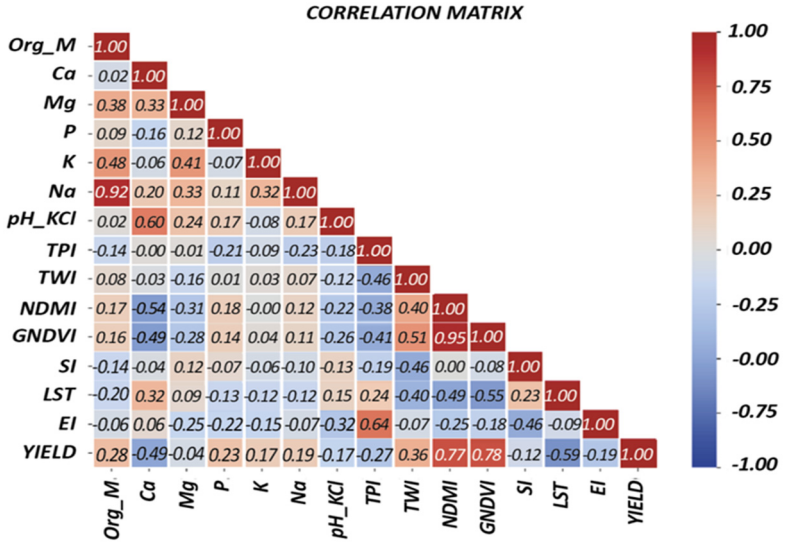



***Fig. 4. Matrix of linear correlation coefficients for the study field No. 2 (authors' own elaboration)***

***Construction of yield prediction models for grain corn based on collected data from the fields studied.***

To build a high-resolution yield prediction model, the study fields are divided into a certain number of subplots, and a separate forecast is generated for each. Let the actual yield value of the *i*-th subplot be denoted as $y_i$, the predicted value as – $\overline{y_i}$ (formula (2)).

$$\overline{y_i} = f_0(x_i), \quad (2)$$

where $x_i \in X$ – is the input data vector describing the condition of the *i*-th subplot, $\theta$ – represents the parameters of the yield prediction model, $f$ – is the functional relationship between the input field condition data and the crop yield of the agricultural crop (Hnatiienko et al., 2024)

Training and validation of the model will be performed using training datasets, namely, data collected from fields No. 1 and No. 2, where each field plot includes yield data in tons per hectare. Since the study fields No. 1 and No. 2 are in different geographic zones and are managed by different agricultural producers, separate yield prediction models will be developed for each field, considering the parameter values (Table 1) for subplots with areas of 5 ha and 1 ha.

The code listings for the presented models are provided in the supplementary materials.

***Validation of grain corn yield prediction models.***

To ensure an objective assessment of the accuracy of the yield prediction models, validation of the results must be performed using statistical metrics. The application of quantitative accuracy indicators is a key stage in the study, as it enables the comparison of different models and the identification of the most effective prediction approaches.

In this study, the following commonly used metrics are applied to evaluate model performance: Root Mean Square

Error ($RMSE$) (formula (3)), Mean Absolute Error ($MAE$) (formula (4)), Mean Absolute Percentage Error ($MAPE$) (formula (5)), and Coefficient of Determination ($R2$) (formula (6)) (Kumar, 2024).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_i^n |y_i - \bar{y}_i|}{n} \quad (4)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_i^n \left|\frac{y_i - \bar{y}_i}{y_i}\right| \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_i^n (y_i - \bar{y}_i)} \quad (6)$$

As part of the study on the effectiveness of the grain corn yield prediction system, the results obtained are presented in Tables 2 and 3.

Analyzing the results, it can be noted that the Random Forest model demonstrates more stable accuracy when the scale of input data changes, compared to Gradient Boosting. Specifically, when transitioning from 5-hectare to 1-hectare subplots, the coefficient of determination $R^2$ for Random Forest increased from 0.614 to 0.776 (+0.162), whereas for Gradient Boosting, the increase was more significant – from 0.562 to 0.801 (+0.239).

A similar trend in performance improvement is observed across other accuracy metrics for the study field No. 1. The Mean Squared Error (MSE) for the Random Forest model decreased from 0.101 to 0.079 (approximately a 22% improvement), while for Gradient Boosting it decreased from 0.115 to 0.071 (approximately a 38 % improvement). This indicates that Gradient Boosting responds more strongly to an increase in data volume, showing a more substantial reduction in error when using a finer grid (1 ha).

It is also worth noting that the Mean Absolute Error ($MAE$) for Random Forest decreased from 0.276 to 0.234 (around a 15 % improvement), whereas for Gradient Boosting it dropped from 0.294 to 0.235 (around a 20 % improvement). Similarly, the Mean Absolute Percentage Error ($MAPE$) for both models declined to approximately the same level (0.029), though Gradient Boosting showed a greater improvement.

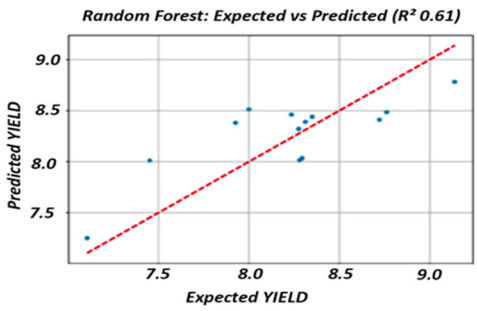
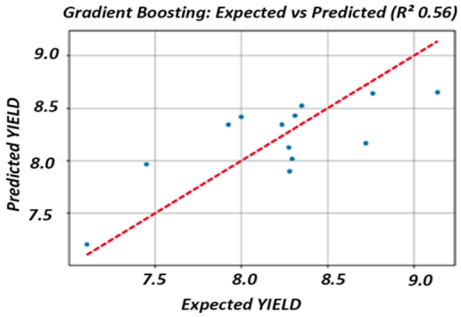
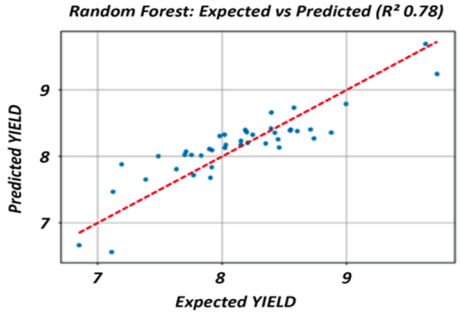
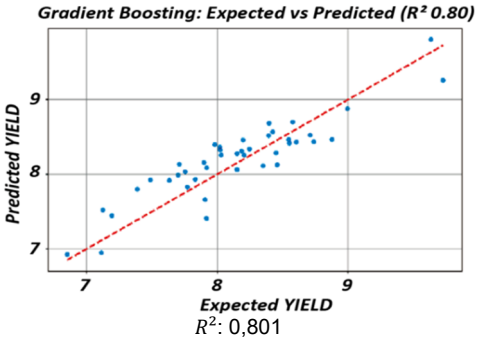
Therefore, the grid resolution (subplot size) matters when predicting yield, but its effect depends on the chosen machine learning algorithm.

The analysis of results for the study, field No. 2 confirms the patterns observed for field No. 1 (Table 3). Specifically, the Random Forest model (Fig. 5) demonstrates high accuracy stability regardless of subplot size: the increase in the coefficient of determination when reducing the grid scale is minimal (from 0.571 to 0.575). In contrast, Gradient Boosting remains more sensitive to spatial granularity: when moving from 5 ha to 1 ha subplots, the model's accuracy increases more significantly (from 0.480 to 0.647).

In conclusion, a finer grid generally improves prediction results, but the degree of this effect depends on the selected algorithm. This implies that the optimal subplot size should be chosen considering both the model's performance and the practical capabilities for data collection.

*Table 2*

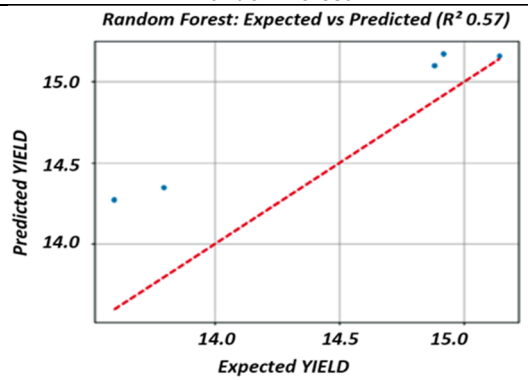
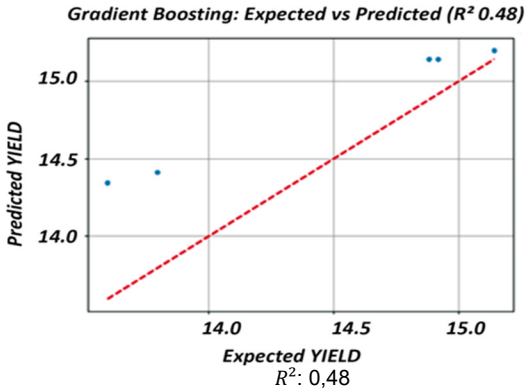
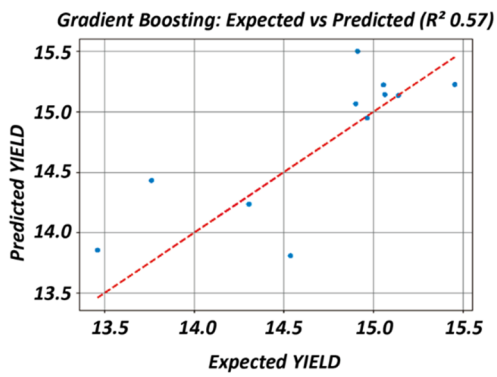
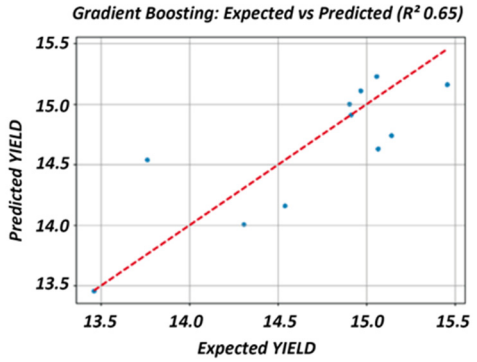
**Validation results of grain corn yield prediction models for the study field No. 1 depending on the subplot size and the machine learning method**

| Subplot size | Machine learning method | |
|---|---|---|
| | Random Forest | Gradient Boosting |
| 5 ha |  $R^2$: 0,614<br>$MSE$: 0,101<br>$MAE$: 0,276<br>$MAPE$: 0,034 |  $R^2$: 0,562<br>$MSE$: 0,115<br>$MAE$: 0,294<br>$MAPE$: 0,036 |
| 1 ha |  $R^2$: 0,776<br>$MSE$: 0,079<br>$MAE$: 0,234<br>$MAPE$: 0,029 |  $R^2$: 0,801<br>$MSE$: 0,071<br>$MAE$: 0,235<br>$MAPE$: 0,029 |

*Source:* authors' own elaboration.

*Table 3*

***Validation results of grain corn yield prediction models for the study field No. 2 depending on the subplot size and the machine learning method***

| Subplot size | Machine learning method | |
|---|---|---|
| | Random Forest | Gradient Boosting |
| 5 ha |  $R^2$: 0,571<br>$MSE$: 0,176<br>$MAE$: 0,344<br>$MAPE$: 0,025 |  $R^2$: 0,48<br>$MSE$: 0,213<br>$MAE$: 0,381<br>$MAPE$: 0,027 |
| 1 ha |  $R^2$: 0,575<br>$MSE$: 0,146<br>$MAE$: 0,283<br>$MAPE$: 0,02 |  $R^2$: 0,647<br>$MSE$: 0,121<br>$MAE$: 0,273<br>$MAPE$: 0,019 |

*Source:* authors' own elaboration.

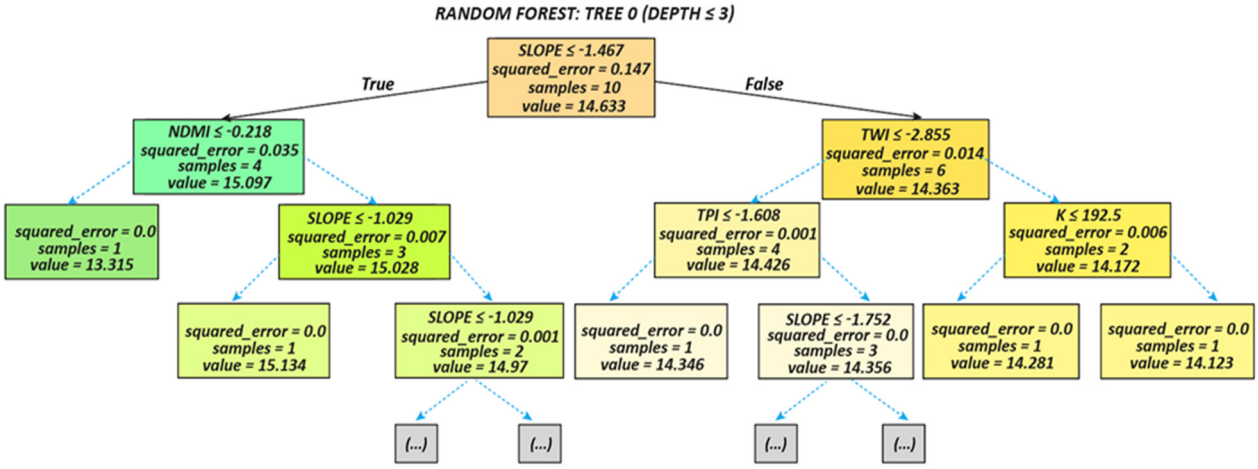



**Fig. 5. Example of the first decision tree for the study field No. 2 with 5 ha subplots (authors' own elaboration)**

Based on the developed machine learning models, grain corn yield prediction was carried out for two agricultural fields with different levels of spatial detail (grids of 1 ha, 2 ha, and 5 ha). The predictors included the vegetation indices GNDVI and NDMI, as well as concomitant variables: soil moisture indicators, soil types, temperature regime, and crop rotation information. Model accuracy was evaluated by comparing the predicted and actual yield values.

For field No. 1, the most accurate results were achieved by the Gradient Boosting model using a 1 ha grid: the

predicted yield was 5.67 t/ha, which was only 0.16 t/ha lower than the actual value of 5.83 t/ha. As the level of spatial aggregation increased, accuracy slightly decreased: 5.60 t/ha at 2 ha and 5.63 t/ha at 5 ha. The Random Forest model, in turn, produced less accurate predictions ranging from 5.55 to 5.61 t/ha for the different grids, with a maximum deviation of 0.28 t/ha.

For field No. 2, the Gradient Boosting model again proved to be the most effective at the 1 ha resolution: the predicted yield was 5.39 t/ha versus an actual yield of 5.52 t/ha (an error of 0.13 t/ha). Other spatial resolutions produced similar results: 5.34 t/ha (2 ha) and 5.37 t/ha (5 ha). The Random Forest model's predictions ranged between 5.29 and 5.35 t/ha.

The obtained results confirm the suitability of Gradient Boosting for accurate yield prediction, especially under conditions of high spatial resolution. In contrast, Random Forest provides stable yet slightly less precise estimates, which can be beneficial in situations with limited access to high-resolution data.

**Discussion and conclusions**

A comprehensive analysis of the factors influencing grain corn yield was conducted using remote sensing data, agrochemical soil analysis results, and topographic characteristics. Correlation analysis made it possible to identify key indicators with the strongest impact on yield, particularly the spectral indices (GNDVI, NDMI).

Yield prediction models were constructed using machine learning methods – Random Forest and Gradient Boosting – for two study fields, with subplot sizes of 5 ha and 1 ha. Their performance was evaluated using the Mean Absolute Error (MAE) and the Coefficient of Determination ($R^2$), enabling the identification of each method's advantages and limitations under conditions of spatially heterogeneous agrolandscapes. Validation results demonstrated that Gradient Boosting is more sensitive to spatial data granularity, significantly improving prediction accuracy with finer grids (1 ha). On the other hand, Random Forest provides consistent results even at coarser spatial resolution, highlighting its robustness when data availability is limited or data volume is smaller.

Overall, the study confirms the importance of integrating multicomponent datasets and considering the field spatial structure to improve yield prediction accuracy. The developed methodology has strong potential for implementation in precision agriculture systems to optimize agronomic practices and enhance resource management efficiency.

**Authors' contribution:** Vitalii Zatserkovnyi – conceptualization, formal analysis, methodology, review and editing; Viktor Vorokh – conceptualization, methodology; Olga Hloba – formal analysis, data processing; Iryna Siuiva – editing, publication analysis, Olesia Liashchenko – review and editing.

**References**

Alpaydin, E. (2010). *Introduction to machine learning* (2nd ed.). The MIT Press.

Ayodele, T. O. (2010). *Introduction to machine learning*. IntechOpen. https://www.intechopen.com/chapters/10703

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Friedman, H. J. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *The Annals of Statistics*, 29(5), 1189–1232. https://doi.org/10.1214/aos/1013203451

Gnatienko, I., Sorochynskyi, I., & Derkach, M. (2024). Comparative analysis of ensemble learning methods for yield prediction based on remote sensing. *Journal of Precision Agriculture and Data Science*, 12(1), 45–58 [in Ukrainian]. [Гнатієнко, І., Сорочинський, І., & Деркач, М. (2024). Порівняльний аналіз методів ансамблевого навчання для прогнозування врожайності на основі дистанційного зондування. *Журнал прецизійного землеробства та наук про дані*, *12*(1), 45–58].

Ivanenko, O., & Sakhno, S. (2021). Use of NDVI and NDMI indices for crop yield estimation in Ukrainian agricultural systems. *Agroecology and Land Management*, *24*(3), 71–78. [In Ukrainian]. [Іваненко, О., & Сахно, С. (2021). Використання індексів NDVI та NDMI для оцінки врожайності в агросистемах України. *Агроекологія і землекористування*, 24(3), 71–78].

Kravchenko, P., & Danylenko, V. (2022). Assessment of vegetation stress indicators for yield forecasting in arid zones of Ukraine. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, *10*(2), 33–41. [In Ukrainian]. [Кравченко, П., & Даниленко, В. (2022). Оцінка індикаторів вегетаційного стресу для прогнозування врожайності в посушливих регіонах України. *Український журнал дистанційного зондування*, 10(2), 33–41].

Kussul, N., Lavreniuk, M., Skakun, S., & Shelestov, A. (2017). Deep learning classification of land cover and crop types using remote sensing data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(5), 778–782. https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2681128

Kuwata, K., & Shibasaki, R. (2015). Estimating crop yields with deep learning and remotely sensed data. In *Proceedings of the 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 858–861). IEEE. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7325924

Lobell, D. B., Thau, D., Seifert, C., Engle, E., & Little, B. (2015). A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment*, 164, 324–333. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.021

Maimaitijiang, M., Sagan, V., Sidike, P., Maimaitiyiming, M., Hartling, S., Peterson, K. T., & Fritschi, F. B. (2020). Soybean yield prediction from UAV using multimodal data fusion and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, 237, 111599. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111599

Makedonska, I. O., Zatserkovnyi, V. I., & Tustanovska, L. V. (2018). Application of GIS technologies and remote sensing in precision farming. In *17th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*. EAGE Publications BV. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201801835

McQueen, R. J., Garner, S. R., Nevill-Manning, C. G., & Witten, I. H. (1995). Applying machine learning to agricultural data. *Computers and Electronics in Agriculture*, 12(4), 275–293. https://doi.org/10.1016/0168-1699(95)98601-9

Melnyk, O. (2023). Application of LSTM neural networks for regional crop yield forecasting based on EO data. *Environmental Modeling and Assessment*, *28*(1), 109–123 [in Ukrainian]. [Мельник, О. (2023). Застосування нейронних мереж LSTM для регіонального прогнозування врожайності на основі даних дистанційного зондування. *Екологічне моделювання та оцінювання*, 28(1), 109–123].

Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242.

Samko, M., Zatserkovnyi, V. I., Vorokh, V., Tsyguliov, I., & Ilchenko, A. (2025, April). *Monitoring using UAVs in precision farming technologies* [Conference presentation]. XVIII International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", Kyiv, Ukraine.

Semeniaka, V., Zatserkovnyi, V. I., Vorokh, V. V., Ilyin, L., & Myronchuk, T. (2024, October 7). *Differential technologies for precision agriculture* [Conference paper]. International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024", European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510098

Shin, J., Kim, N., & Lee, H. (2021). Evaluation of machine learning models for predicting crop yield at field level. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 106037. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106037

Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2016). *Data mining: Practical machine learning tools and techniques*. Morgan Kaufmann. https://doi.org/10.1016/c2009-0-19715-5

Xu, X., Gao, P., Zhu, X., Guo, W., Ding, J., Li, C., & Wu, X. (2019). Design of an integrated climatic assessment indicator (ICAI) for wheat production: A case study in Jiangsu Province, China. *Ecological Indicators*, 101, 943–953. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.059

You, J., Li, X., Low, M., Lobell, D., & Ermon, S. (2017). Deep Gaussian processes for crop yield prediction based on remote sensing data. In *Proceedings of the 31st AAAI Conference on Artificial Intelligence* (pp. 4559–4566). AAAI Press. https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.11273

Zatserkovnyi, V., Vorokh, V., Hloba, O., Mironchuk, T., & Siuiva, I. (2025). Agrochemical analysis of soils in precision farming technologies: a case study of the Chernihiv region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *1*(108), 85-93. https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.12

**Отримано редакцією журналу / Received: 12.09.25**
**Прорецензовано / Revised: 28.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ[1], д-р техн. наук, проф.**
**ORCID ID: 0009-0003-5187-6125**
**e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com**

**Віктор ВОРОХ[1], асп.**
**ORCID ID: 0009-0005-0112-8422**
**e-mail: fainkucha@gmail.com**

**Ольга ГЛОБА[1], студ.**
**ORCID ID: 0009-0003-4923-3374**
**e-mail: olgagloba73@knu.ua**

**Олеся ЛЯЩЕНКО[1], канд. філол. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0003-4649-3667**
**e-mail: Lyashchenko1981@ukr.net**

**Ірина СЮЙВА[1], канд. юр. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0002-5001-2750**
**e-mail: isiuiva.knu@gmail.com**

**[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна**

# ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ТА ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ В ПРОГНОЗУВАННІ ВРОЖАЙНОСТІ

**В с т у п .** ***Прогнозування врожайності сільськогосподарських культур завжди було непростим завданням, особливо в умовах кліматичної нестабільності та зростаючого тиску на ресурси. Зважаючи на обмеження класичних математичних моделей у такій складній галузі, як аграрна аналітика, нині все більшої ваги набувають підходи, основані на даних і машинному навчанні. Особливо перспективним виглядає поєднання супутникових знімків, агрохімічного аналізу ґрунтів та алгоритмів штучного інтелекту для побудови гнучких і точних прогнозів.***

**М е т о д и .** ***Проаналізовано два сільськогосподарські поля, розташовані в різних регіонах України, із різними природними умовами. Було зібрано масив даних: топографічні параметри (висота, ухил, водозбірний потенціал), спектральні індекси із супутників Sentinel-2A та Landsat 8 (зокрема, NDMI, GNDVI), а також хімічний склад ґрунту. За допомогою кореляційного аналізу визначено, які саме показники тісніше пов'язані з рівнем урожайності. Побудовано моделі прогнозу врожайності на основі Random Forest та Gradient Boosting, з адаптацією під розділення полів на підділянки розміром 5 та 1 га.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***Аналіз показав, що стан вегетації та водний баланс культури (NDMI, GNDVI) найкраще пояснюють варіації врожайності. Водночас такі показники, як температура поверхні, мають чіткий негативний вплив, що може вказувати на тепловий стрес у періоди наливу зерна. Gradient Boosting продемонстрував особливо добру чутливість до просторової деталізації – на сітці 1 га точність прогнозу досягала $R^2 = 0,801$. Натомість Random Forest показав себе як стійкий і менш чутливий до масштабу даних метод.***

**В и с н о в к и .** ***У досліджені доведено, що поєднання супутникових знімків, результатів аналізу ґрунтів та методів машинного навчання дає змогу поліпшити точність прогнозування врожайності. У моделі включено показники вегетації та характеристики умов вирощування культур. Також проведено порівняння різних алгоритмів при різній деталізації просторових даних. Отримані результати свідчать про те, що запропонований підхід може бути корисним у практиці точного землеробства, особливо для агрономічного планування та моніторингу посівів.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***штучний інтелект (ШІ), машинне навчання (ML), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), random forest (RF), gradient boosting (GB), normalized difference moisture index (NDMI), green normalized difference vegetation index (GNDVI), прецизійне землеробство (PZ), кореляційний аналіз (КА).***

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

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

UDC 551.586
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.14

Gunesh AGAKISHIYEVA, PhD (Geogr.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-8200-7278
e-mail: guneshagakishiyeva@gmail.com
Institute of Geography, Ministry of Science and Education, Baku, Azerbaijan

Emil JABRAYILOV, Researcher
ORCID ID: 0000-0001-9391-4319
e-mail: emil.jabrayilov@gmail.com
Institute of Geography, Ministry of Science and Education, Baku, Azerbaijan

Jahan MAMMADOVA, PhD (Geogr.)
ORCID ID: 0009-0002-1750-1664
e-mail: guneshagakishiyeva@gmail.com
Azerbaijan State Pedagogical University, Baku, Azerbaijan

# SPATIOTEMPORAL ANALYSIS OF THERMAL COMFORT IN AZERBAIJAN

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром географ. наук, проф. Дмитром ЛЯШЕНКОМ*)

**Background.** ***Understanding spatiotemporal patterns of thermal comfort is crucial for developing sustainable tourism strategies in geographically diverse regions. This comprehensive study investigates Azerbaijan's complex bioclimatic conditions using the Universal Thermal Climate Index (UTCI), with particular emphasis on how the country's remarkable topographic diversity – ranging from the Caspian coastline to mountain zones – creates distinct microclimates that influence visitor comfort and tourism potential. As climate change continues to alter thermal environments globally, this research provides critical baseline data for adaptive tourism planning in transitional climate zones.***

**Methods.** ***The study employed ERA5-HEAT reanalysis data to calculate UTCI values, incorporating four key meteorological parameters: air temperature, relative humidity, wind speed, and mean radiant temperature. Advanced spatial analysis techniques were implemented using ArcGIS, including interpolation for creating continuous UTCI surfaces, zonal statistics for regional comparisons, and elevation-based corrections using SRTM 30 m DEM data.***

**Results.** ***The analysis revealed extreme annual UTCI variations (–21.0 °C in January highlands to 28.4 °C in August lowlands), demonstrating Azerbaijan's exceptional bioclimatic diversity. Mountainous regions (Greater and Lesser Caucasus) showed prolonged cold stress (UTCI<0°C for 4–5 months), while lowland areas (Kura-Aras plain, Caspian coast) experienced significant summer heat stress (UTCI>26°C for 60–90 days). Optimal thermal comfort conditions (UTCI 9–26 °C) were most persistent in spring (April–May) and autumn (September–October), particularly at mid-elevations (500–1000 m).***

**Conclusions.** ***This study demonstrates that Azerbaijan's thermal comfort patterns are fundamentally governed by topographic factors. The findings enable precise, climate-responsive tourism planning: cultural and beach tourism in lowlands during shoulder seasons (April–June, September–October), alpine tourism in mountain zones during summer, and winter sports in high-elevation areas. The UTCI-based framework developed here proves particularly valuable for managing thermal stress extremes in both hot and cold environments. These results have immediate practical applications for tourism infrastructure development, seasonal marketing strategies, and climate adaptation planning.***

**Keywords:** ***UTCI, Azerbaijan, thermal comfort, tourism climatology, sustainable tourism.***

## Background

Tourism is one of the fastest-growing economic sectors globally, with its development and sustainability heavily influenced by climatic conditions that directly affect destination attractiveness, visitor comfort, and recreational activities (Scott, 2006). As travelers increasingly prioritize destinations with favorable weather, understanding the complex interplay between climate and tourism demand has become critical for sustainable destination planning and management (Matzarakis, 2006). The relationship between climate and tourism is particularly significant in regions with diverse climatic zones, where seasonal variations can create both opportunities and challenges for tourism development. In this context, thermal comfort indices have emerged as essential tools for evaluating how humans physiologically perceive outdoor weather conditions, providing a more comprehensive understanding of destination suitability across different times of the year (Bröde et al., 2012).

The natural environment plays a dual role in tourism development, serving simultaneously as a limiting factor and a fundamental resource. Different types of recreational activities require specific environmental conditions to be viable and enjoyable. As emphasized by Nepomnyaschiy and Makeeva (2025), reliable assessment of these natural conditions demands detailed climate mapping based on long-term meteorological data, particularly when planning tourist routes and infrastructure.

Solar radiation patterns significantly influence recreational potential. Research by Kotlyarova (2020) identifies optimal conditions for outdoor activities occurring with 2,000–2,300 annual sunshine hours, while regions with less than 1,700 hours face substantial limitations for tourism development. These insolation regimes interact with other climatic factors to create distinct recreational environments.

Bioclimatic parameters are systematically classified by their physiological impact into irritating (adversely stressing human adaptation), training (moderately stressful but beneficial for healthy individuals), and sparing (universally favorable, even for medically supervised rest) categories (Kolotova, 1999). This classification underpins recreational zoning, where territories are categorized as comfortable (sparing/sparing-training regimes), relatively comfortable (mixed sparing/irritating regimes), uncomfortable (persistent irritating regimes), or extreme (year-round irritating conditions) (Kruzhalin et al., 2014). The recreational potential of a region depends critically on the duration of favorable periods permitting unrestricted outdoor activities versus discomfort periods when extreme temperatures, humidity, or wind impose physiological limits (Kuskov, Golubeva, & Odintsova, 2005). This bioclimatic framework

© Agakishiyeva Gunesh, Jabrayilov Emil, Mammadova Jahan, 2025

ISSN 1728-3817

guides critical decisions in resort planning, from site selection and seasonal programming to therapeutic design, by identifying areas with optimal sparing/training conditions while mitigating irritating factors. The classification system enables precise matching of recreational activities and health treatments to local bioclimatic conditions, though modern approaches now augment these traditional categories with more comprehensive indices that integrate multiple atmospheric parameters.

Azerbaijan's exceptional climatic diversity, spanning semi-arid lowlands to alpine zones, creates unique opportunities for year-round tourism, though systematic assessment of thermal comfort remains understudied. The country's solar energy potential is particularly notable, with the Kura-Aras Lowland and Absheron Peninsula receiving 2,700–2,800 annual sunshine hours. Radiation patterns show altitudinal gradients–lowlands receive 125–145 cal/cm² total radiation (45–60 cal/cm² balance) while highlands gain 150–160 cal/cm² total radiation but with reduced balance (10–20 cal/cm²) (National Atlas of the Republic of Azerbaijan, 2014). These physical parameters interact with human comfort thresholds, where Equivalent Effective Temperature (EET) defines optimal conditions at 17.3–21.7 °C, with hot (>22 °C) and cold (<17 °C) discomfort zones (Ayyubov, 1987).

However, despite its growing tourism sector, there is a notable lack of empirical studies examining thermal comfort suitability for recreation in Azerbaijan. This gap in research limits the ability of policymakers and tourism planners to make evidence-based decisions that could enhance visitor experiences and optimize seasonal tourism strategies. While previous research has successfully applied Universal Thermal Climate Index (UTCI) in Mediterranean and Central European destinations to assess tourism climate potential (Pantavou et al., 2013; Rutty, & Scott, 2014), its application in the South Caucasus, particularly in Azerbaijan, remains unexplored, leaving a critical research void.

This study seeks to address this gap by conducting a comprehensive spatiotemporal analysis of thermal comfort across Azerbaijan. Specifically, the research aims to calculate UTCI values for each month of the year to map variations in thermal comfort, identify optimal periods and regions for different types of tourism activities–such as beach tourism in the summer and cultural tours in the spring and autumn. By doing so, the study will help mitigate vulnerabilities associated with thermal stress, such as extreme heat in lowland areas or cold stress in mountainous regions, while promoting sustainable tourism practices. The UTCI's robustness as a biometeorological metric – integrating air temperature, humidity, wind speed, and mean radiant temperature into a single indicator (Jendritzky, De Dear, & Havenith, 2012) – makes it particularly suitable for evaluating Azerbaijan's climatic suitability for tourism.

The implications of this study extend beyond academic interest, offering practical value for stakeholders in Azerbaijan's tourism sector. By bridging climatology and tourism geography, the research contributes to sustainable tourism planning by helping policymakers and industry leaders develop strategies to mitigate seasonality challenges, such as promoting shoulder seasons when thermal conditions are most favorable. Additionally, the findings will enhance the visitor experience by enabling tourists to make informed decisions based on anticipated thermal comfort conditions. From a broader perspective, the study also addresses climate adaptation, providing insights into how shifting comfort zones under global warming (Change, Intergovernmental Panel on Climate, 2007) may impact tourism in Azerbaijan and similar regions. The methodological framework developed in this research can be applied to other climatically diverse areas, offering a replicable approach for assessing tourism climate potential worldwide.

While this study provides a novel assessment of thermal comfort for Azerbaijan, its findings are contextualized within a growing body of regional research that underscores the critical influence of climate on tourism potential. Similar methodological approaches have been successfully applied in neighboring regions with comparable climatic challenges. For instance, research in the arid landscapes of Khorasan Razavi, Iran (Baaghideh et al., 2016), demonstrates the utility of the UTCI index in evaluating heat stress. Further north, studies on the continental climate of Northern Kazakhstan (Pashkov et al., 2023) have employed climate indices to assess and zone territorial suitability for tourism. The application of alternative indices like the Physiologically Equivalent Temperature (PET), as demonstrated in a comprehensive national-scale study of Iran (Daneshvar, Bagherzadeh, & Tavousi, 2013), further enriches the regional framework for bioclimatic analysis. This study contributes to this regional discourse by providing the first comprehensive UTCI-based analysis for the South Caucasus, offering comparative insights for similar topographically diverse and climatically transitional regions and addressing a significant gap in the literature between the well-studied Mediterranean and Central Asian zones.

**Methods**

*Study Area.* Azerbaijan is situated in the South Caucasus region at the intersection of Eastern Europe and Western Asia, encompassing a wide range of physiogeographic and climatic zones. Geographically, the country lies approximately between 38°24′ to 41°54′ N latitude and 44°46′ to 50°51′ E longitude (Fig. 1). It shares borders with Russia to the north, Georgia to the northwest, Turkey and Armenia to the west, Iran to the south, and the Caspian Sea to the east. Azerbaijan's landscape is characterized by contrasting terrain, from the low-lying Kura-Aras Lowland in the central part of the country to the towering peaks of the Greater Caucasus in the north and the Lesser Caucasus in the west and southwest. Elevations range from −28 meters below sea level along the Caspian shoreline to over 4,466 meters above sea level at Mount Bazarduzu, the country's highest point (Jabrayilov, 2022).

The country experiences considerable climatic diversity, influenced by elevation, latitude, and proximity to the Caspian Sea. In the central lowlands, the climate is predominantly semi-arid, with hot, dry summers and mild winters. The southeastern region, especially around the Lankaran lowland near the Caspian coast, has a humid subtropical climate, supporting rich forest vegetation. The mountainous areas exhibit alpine and subalpine conditions, with cooler temperatures, increased precipitation, and seasonal snow cover.

This combination of climatic zones and diverse relief makes Azerbaijan an ideal natural laboratory for investigating spatial and temporal variations in thermal comfort, especially in the context of climate change, urban development, and ecological sustainability. The complexity of its microclimates across short distances enhances the relevance of climate and thermal perception modeling in both urban and rural contexts.

*Data Collection.* This study utilized the ERA5-HEAT (Human thErmAl comforT) dataset (Di Napoli et al., 2021) from the Copernicus Climate Data Store (CDS) to assess thermal comfort conditions across Azerbaijan. The dataset, developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), represents the current state-

of-the-art in bioclimatological data, providing global coverage of human thermal stress indices derived from ERA5 reanalysis. We focused on two key variables: the Mean Radiant Temperature (MRT) and Universal Thermal Climate Index (UTCI), which integrates air temperature (°C) at 2 m height, relative humidity (%), wind speed (m/s) measured at 10 m height (adjusted to 1.1 m for UTCI), and solar radiation (W/m²) into a physiologically relevant metric. The dataset offers comprehensive temporal coverage from 1940 to near real-time at 0.25° × 0.25° spatial resolution, with data available in hourly, daily, monthly, seasonal, and yearly aggregations.

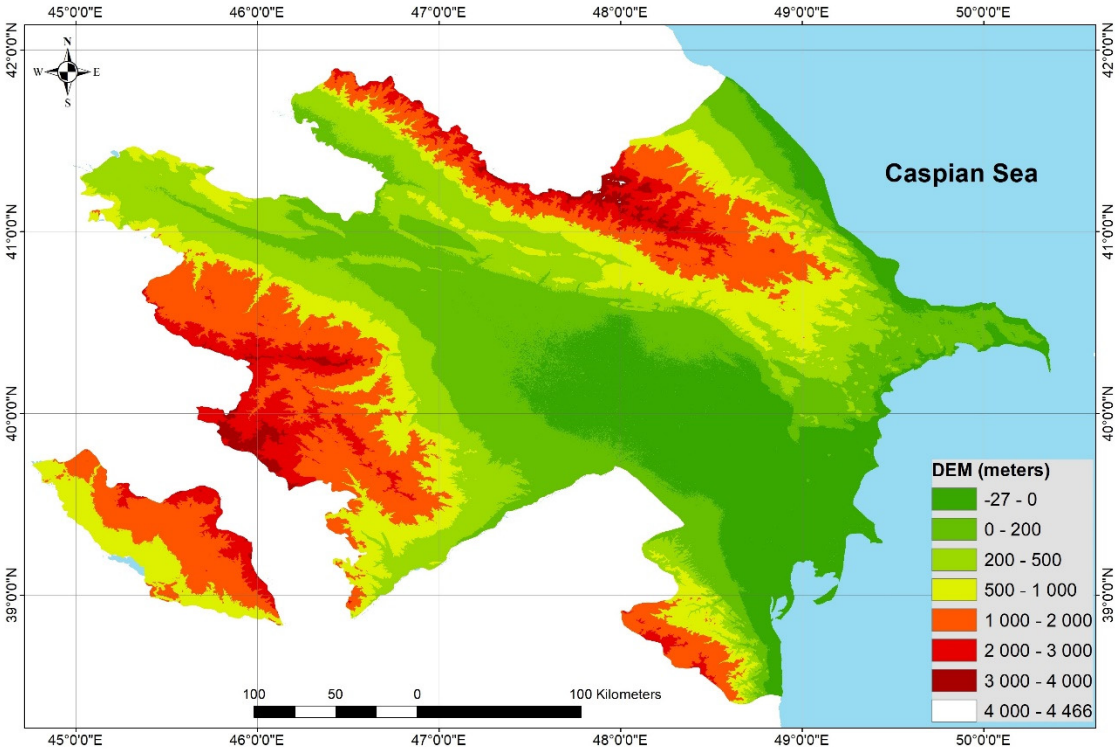



**Fig. 1. Digital Elevation Model of Azerbaijan showing topographic variation (Data source: NASA SRTM v3)**

*Data processing* began with the retrieval of UTCI values for Azerbaijan's geographic extent (38°N–42°N, 44°E–51°E) from 2004 to 2024 using the Copernicus CDS API. The UTCI values, originally in Kelvin, were converted to Celsius for practical interpretation. Monthly averages and seasonal summaries were computed to analyze temporal patterns in thermal comfort. To enhance spatial resolution, we applied bilinear interpolation in ArcGIS, downscaling the data from 25 km to 1 km resolution while incorporating elevation adjustments from SRTM DEM and land-cover weights from ESA WorldCover 2021. This approach allowed us to account for local topographic and urbanization effects on thermal conditions.

While the dataset provides robust global coverage, we acknowledge limitations including its 25 km resolution, which may overlook microclimatic variations in mountainous areas, and its assumption of standard clothing insulation (0.9 clo), which may not fully reflect local attire practice.

*UTCI Calculation*

The Universal Thermal Climate Index (UTCI) was calculated using ArcGIS's geospatial processing tools to assess thermal comfort conditions across Azerbaijan. The computation incorporated four key meteorological parameters prepared as raster layers: air temperature (Ta in °C), mean radiant temperature (Tmrt in °C), relative humidity (RH in %), and wind speed at 10 m height (v10 in m/s).

First, wind speed was adjusted from 10 m to 1.1 m height (approximating human height) using the logarithmic wind profile formula: $v1.1=v10\times(\ln(1.1/z_0)/\ln(10/z0))$, where $z_0$ represents surface roughness length (0.03 m for open terrain). This adjustment was implemented through ArcGIS's Raster Calculator tool.

The UTCI was then calculated using the simplified polynomial approximation developed by Bröde et al. (2012). The formula applied in ArcGIS was:

$$UTCI=Ta+0.348\times(RH/100)-0.70\times v1.1+0.70\times(Tmrt-Ta)/(1+0.155\times v1.1)-0.0023\times(Tmrt-Ta)\times(RH/100)$$

where all input variables were processed as continuous raster layers.

The resulting UTCI raster was reclassified into nine thermal stress categories following international standards, with particular attention to the optimal comfort range (9–26°C) for tourism activities. This ArcGIS-based approach provided spatially explicit UTCI mapping suitable for regional tourism climate analysis while maintaining computational efficiency. The methodology leveraged ArcGIS's robust raster processing capabilities to handle large datasets across Azerbaijan's diverse climatic zones.

*Classification of Thermal Comfort.* UTCI values were categorized into thermal stress classes (Table 1) per international standards (Di Napoli et al., 2018; Blazejczyk et al., 2012).

**Results**

The analysis of monthly UTCI values across Azerbaijan from 2004 to 2024 revealed distinct spatiotemporal patterns of thermal comfort conditions. The UTCI maps, showed values ranging from extreme cold stress (–21 °C in January) to moderate heat stress (28.4 °C in August) (Fig. 2–4). During winter months, the mountainous regions of Greater and Lesser Caucasus exhibited the coldest conditions, while

relatively milder thermal comfort (UTCI 0–9 °C) prevailed in central lowland areas including the Kura-Aras plain, Southeastern Shirvan plain, Mil plain, Mugan plain, and Lankaran lowland, as well as along the Caspian Sea coasts. Summer months presented a contrasting pattern, with August showing the most pronounced heat stress, particularly in low-lying regions. The persistent thermal comfort conditions in central plains during winter and coastal areas suggest these regions may offer more favorable conditions for year-round outdoor activities and tourism compared to the extreme seasonal variations experienced in mountainous zones. These findings provide valuable insights for tourism planning and highlight the importance of considering microclimatic variations when assessing human thermal comfort across Azerbaijan's diverse landscapes. The comprehensive 20-year dataset offers a robust basis for understanding long-term thermal comfort trends in the region.

*Table 1*

**UTCI thermal stress categories**

| UTCI Range (°C) | Thermal Perception | Physiological Impact |
|---|---|---|
| < -40 | Extreme cold stress | High risk of frostbite |
| -40 to -27 | Very strong cold stress | Significant discomfort |
| -27 to -13 | Strong cold stress | Shivering likely |
| -13 to 0 | Moderate cold stress | Mild discomfort |
| 0 to 9 | Slight cold stress | Neutral for active individuals |
| 9 to 26 | No thermal stress | Comfortable for most |
| 26 to 32 | Moderate heat stress | Increased sweating |
| 32 to 38 | Strong heat stress | Risk of heat exhaustion |
| > 38 | Very strong heat stress | Danger of heat stroke |

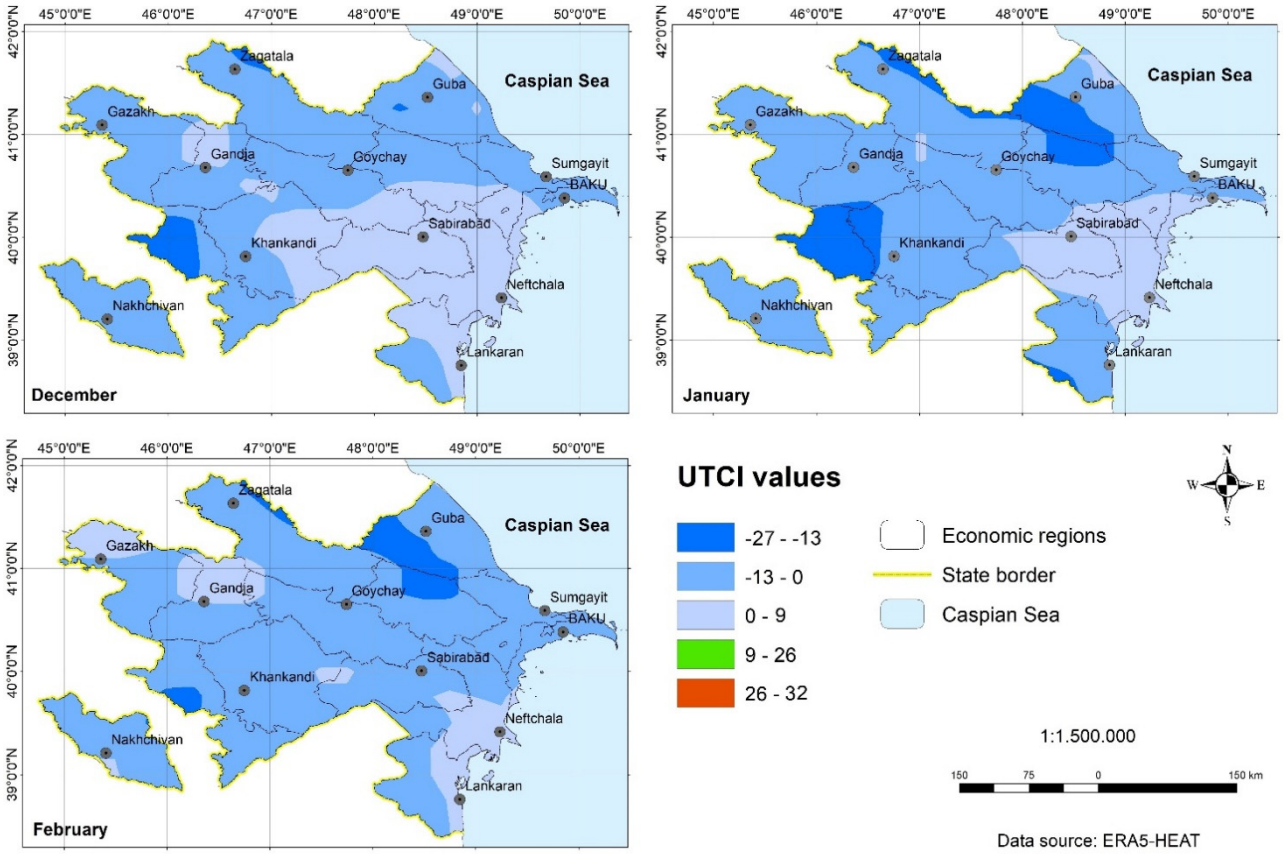



**Fig. 2. Monthly values for UTCI in winter**

The analysis of UTCI values during spring months revealed distinct spatial patterns across Azerbaijan's varied topography. UTCI values ranged from –13 °C in mountainous areas to 15.5 °C in lowland plains (Fig. 3), demonstrating the significant influence of elevation on thermal comfort conditions. Spring emerged as the most favorable season for tourism and outdoor activities, with particularly comfortable conditions (UTCI 9–26 °C) prevailing across most of the country during April and May. The spatial distribution showed a clear elevation gradient, with optimal thermal comfort conditions concentrated in lower-lying areas including the Kura-Aras lowland, Mugan plain, and coastal regions along the Caspian Sea. These low-elevation areas benefited from milder temperatures and reduced cold stress compared to mountainous regions, where winter-like conditions persisted into early spring. The consistent pattern of more favorable thermal conditions at lower elevations suggests these areas may be particularly suitable for springtime tourism development and outdoor recreational planning.

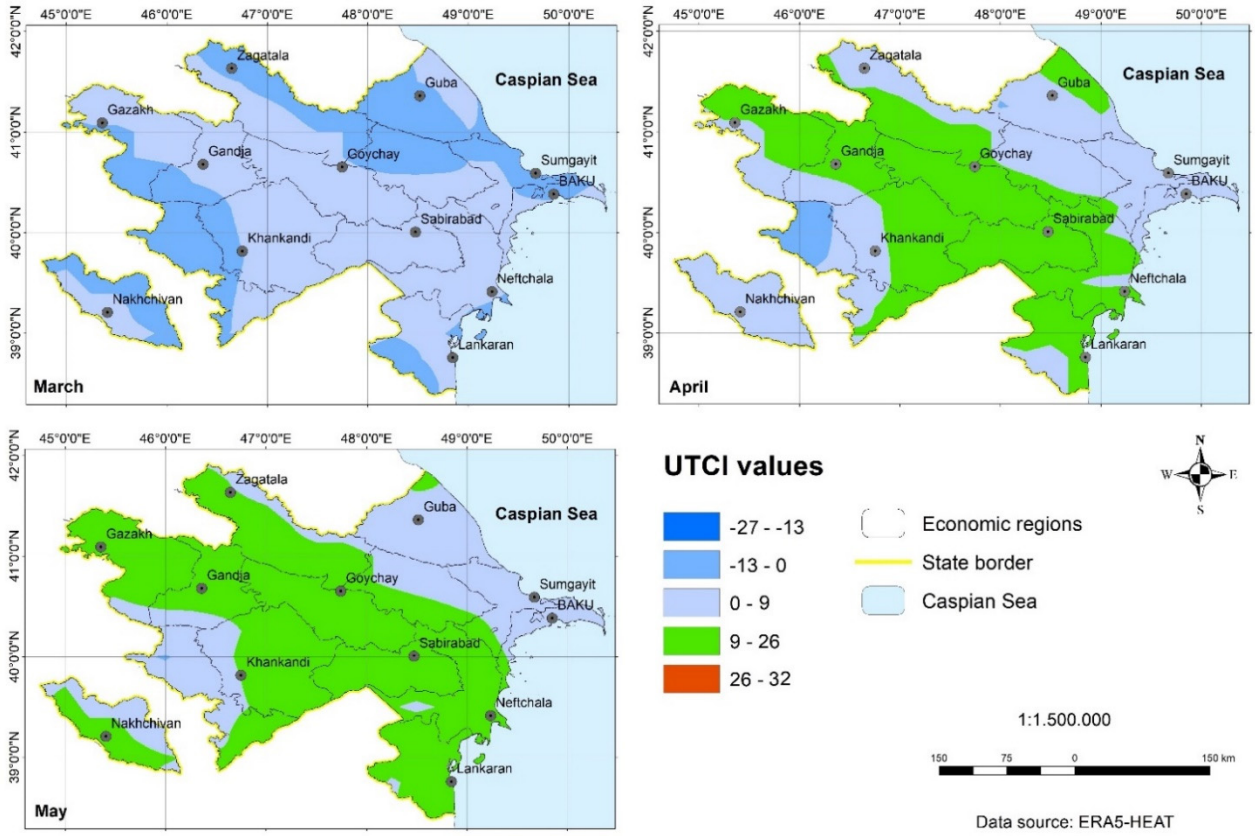



**Fig. 3. Monthly values for UTCI in spring**

During summer months, Azerbaijan exhibited a wide range of UTCI values from 5.3 °C to 28.4 °C (Fig. 4). While most regions experienced no thermal stress (UTCI 9–26 °C), creating favorable conditions for summer tourism, distinct spatial patterns emerged. June showed transitional conditions with slightly cold stress persisting in upper mountain regions, particularly in the Greater and Lesser Caucasus ranges. The most intense heat stress occurred in central and eastern lowland areas, with peak UTCI values recorded in urban centers like Baku and Sumgait, as well as in the southern districts of Neftchala, Sabirabad, Saatli, and Imishli. These areas, characterized by their low elevation, consistently demonstrated the highest UTCI values during summer months, often reaching the upper thresholds of thermal comfort or entering moderate heat stress conditions. The spatial distribution of summer UTCI values reveals an important consideration for tourism planning, with coastal areas along the Caspian Sea and higher elevation regions offering more moderate thermal conditions compared to the intense heat of central lowlands. This pattern suggests that while much of the country experiences physiologically comfortable conditions in summer, careful consideration of microclimatic variations is essential for optimizing tourist experiences and managing heat-related health risks.

The autumn months in Azerbaijan exhibited a gradual transition from warm to cold thermal conditions, with distinct spatial variations in UTCI values ranging from 20 °C to –16 °C (Fig. 5). September and October maintained optimal thermal comfort (UTCI 9–26 °C) across all lowland and plain regions, including the Kura-Aras lowland, Mugan plain, and the Caspian coastal zone, providing ideal conditions for outdoor tourism activities. By November, thermal comfort levels became comparable to those of December, with cooler conditions extending across the central plains, while mountainous regions began experiencing cold stress (UTCI <0 °C). This seasonal shift highlights the narrowing window of comfortable conditions as winter approaches, with early autumn (September–October) offering the most favorable period for tourism in lowland regions before colder temperatures set in. The persistence of no thermal stress in plain areas during early autumn underscores their suitability for extended seasonal tourism compared to higher-elevation zones, where colder conditions arrive earlier. These findings emphasize the importance of timing for tourism planning, with September and October representing peak comfort months for most of the country before thermal stress increases in November.

The monthly UTCI extremes in Azerbaijan demonstrate how topography drives thermal comfort variations across different elevations (Fig. 6). The data reveals that mountain regions experience severe cold stress in winter (UTCI – 21.0 °C in January), while lowland areas reach moderate heat stress in summer (UTCI 28.4 °C in August). This 49.4 °C annual UTCI range primarily reflects elevation differences rather than continental effects alone, with three key patterns emerging:

• High-altitude zones maintain prolonged cold stress due to radiative cooling and persistent inversion layers, particularly in the Greater and Lesser Caucasus where January's UTCI matches extreme continental climates.

• Lowland basins show accentuated summer heat stress (UTCI >26 °C June–August) from combined temperature-humidity effects in the Kura-Aras and Caspian coastal plains.

• Transitional months (April–May, September–October) reveal the strongest relief-induced contrasts, where mountain valleys can simultaneously experience thermal comfort (UTCI 9–15 °C) while nearby peaks remain in cold stress.

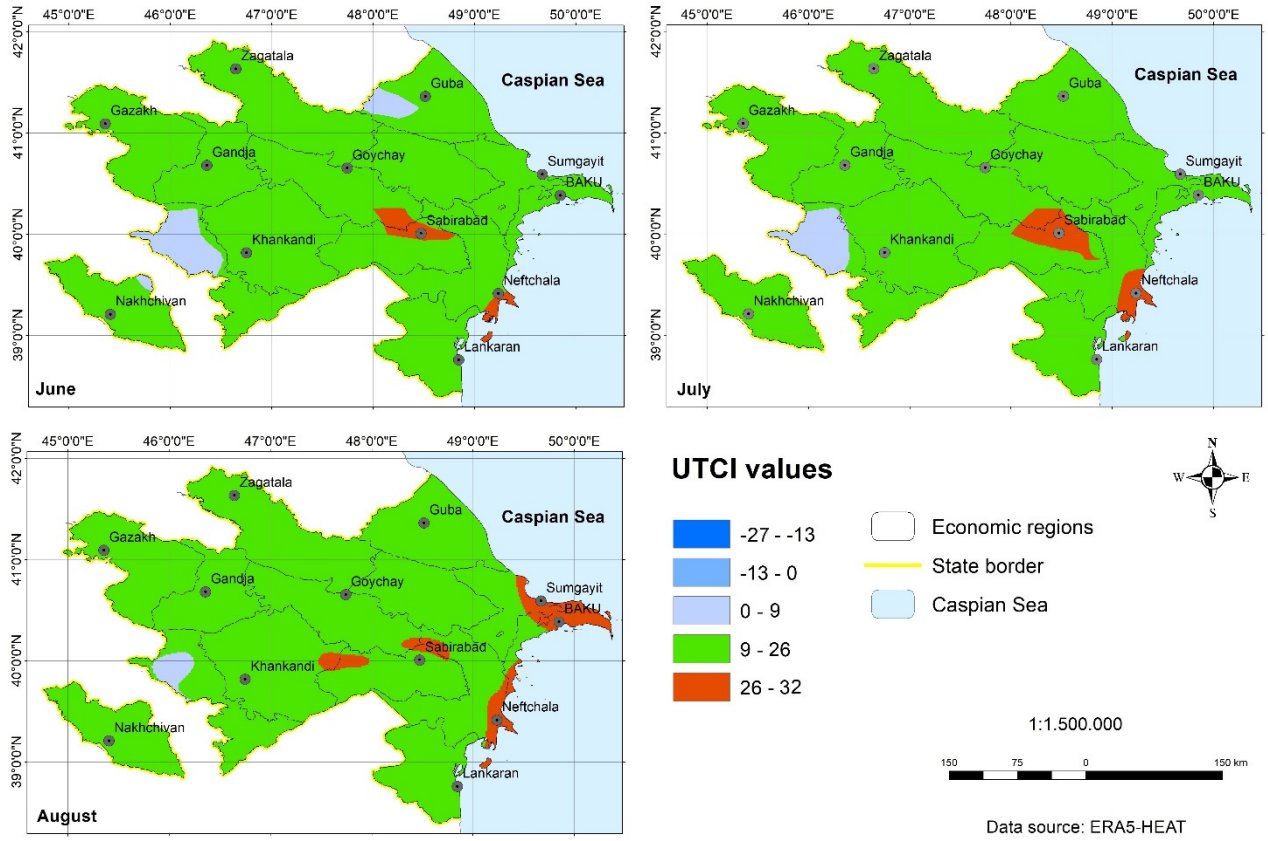



**Fig. 4. Monthly values for UTCI in summer**

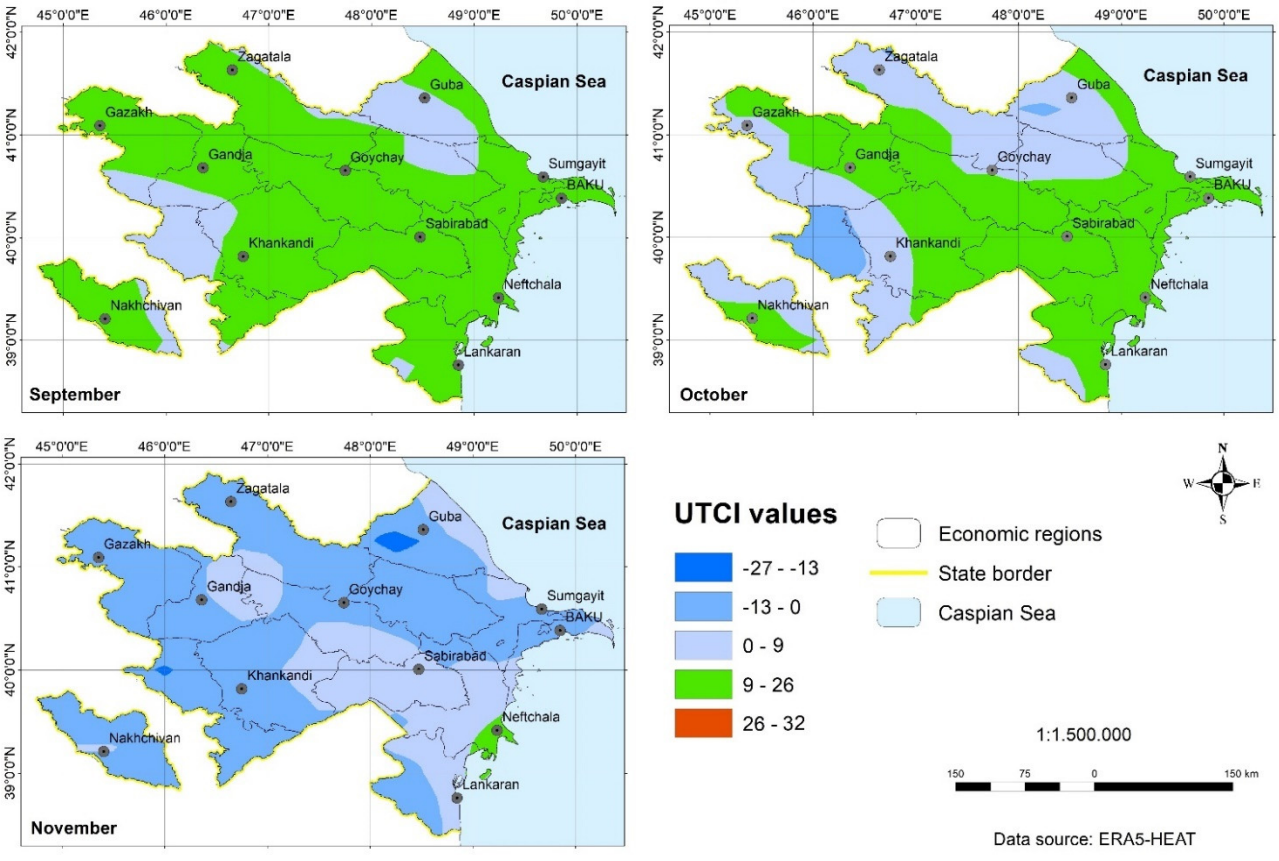



**Fig. 5. Monthly values for UTCI in autumn**

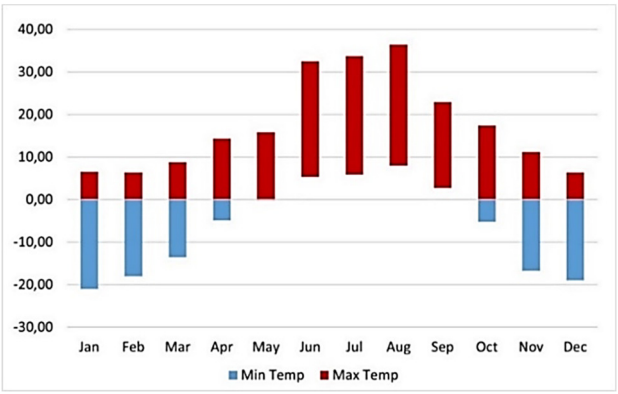



**Fig. 6. Mean monthly values of UTCI**

The mean annual UTCI across Azerbaijan ranges from –4.3 °C to 14.1 °C, demonstrating significant spatial variation tied to elevation and geography (Fig. 7). High-altitude regions of Greater and Lesser Caucasus Mountains experience moderate cold stress conditions (UTCI –4.3 °C to 0 °C), while transitional zones including Ganja, Gazakh, Khankandi, Goychay, Guba, Nakhchivan show moderate conditions (0 °C to 9 °C). The most favorable thermal environments (9 °C to 14.1 °C) are found in lowland and coastal areas such as Lankaran, Neftchala, Sabirabad districts, and the Kura-Aras plain. Notably, Lankaran's subtropical coastal climate maintains the highest mean annual UTCI values (12–14.1 °C), making it particularly suitable for year-round tourism, while Nakhchivan exhibits greater seasonal variability due to its continental highland climate. These patterns highlight how Azerbaijan's diverse topography creates distinct thermal comfort zones, with lower elevations generally offering more favorable conditions for tourism and outdoor activities compared to mountainous regions that require specialized seasonal adaptations.

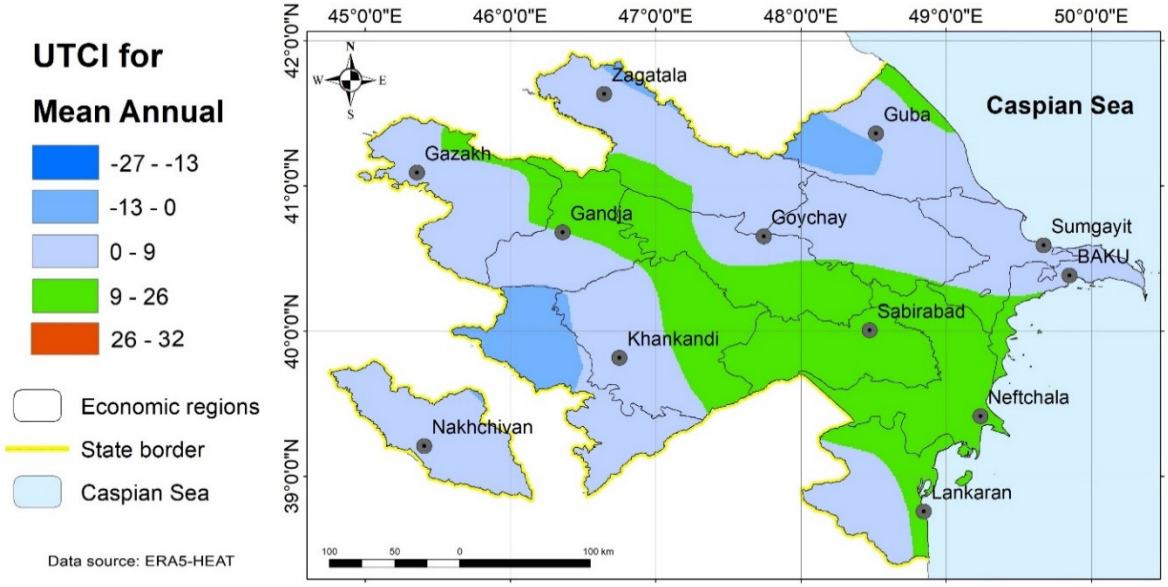



**Fig. 7. Distributions of UTCI based on mean annual values**

The analysis of district-level mean UTCI values reveals clear spatial patterns in thermal comfort conditions across Azerbaijan. Two distinct clusters emerge from the data: mountainous districts exhibit significantly lower values, while lowland areas demonstrate consistently higher thermal comfort levels. Among the cooler regions, Kalbajar (–2.5 °C) and Lachin (–1.5 °C) districts represent the most extreme cases of cold stress, characteristic of high-altitude zones in the Lesser Caucasus. Transitional districts such as Guba (0.6 °C), Gusar (1.8 °C), and Shusha (2.6 °C) show progressively milder conditions, though still below optimal comfort thresholds (Fig. 8). The warmer cluster presents a striking contrast, with all lowland districts exceeding 10 °C. Mingachevir (10.4 °C) and Lankaran (10.6 °C) mark the lower boundary of this group, while central and southeastern plains districts – particularly Neftchala (12.7 °C), Salyan (12.4 °C), and Sabirabad (12.3 °C) – record the highest values (Fig. 9). This pronounced thermal gradient between highland and lowland areas, spanning nearly 15 °C from coldest to warmest districts, underscores the critical role of elevation and geography in shaping local microclimates. The consistent warmth of southern and central lowlands suggests greater potential for year-round tourism development compared to mountainous regions, where thermal conditions impose significant seasonal limitations on outdoor activities. These spatial variations in UTCI values provide valuable insights for regional tourism planning and infrastructure development tailored to local climatic realities.

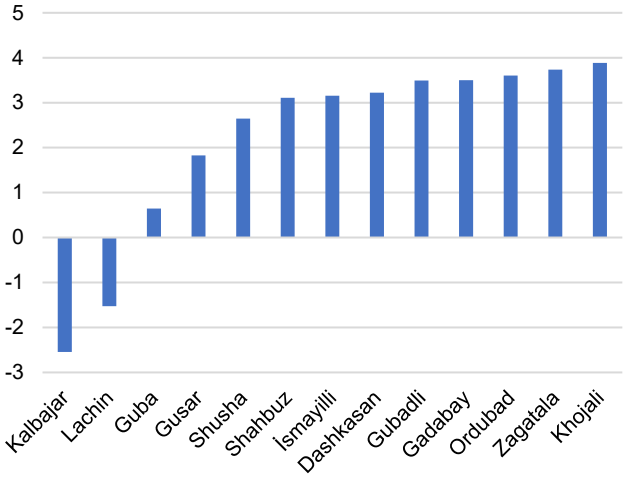



**Fig. 8. Districts with lower UTCI values**

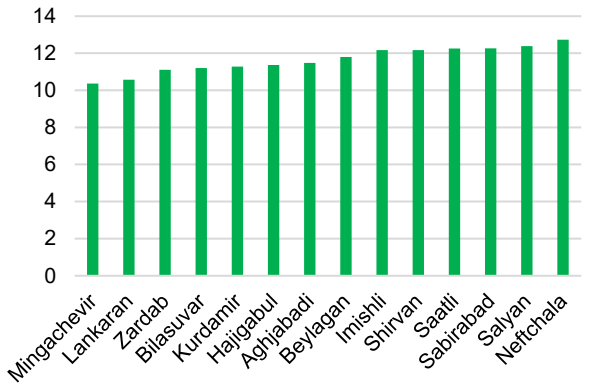



**Fig. 9. Districts with higher UTCI values**

## Discussion and conclusions

This study comprehensively analyzed the spatiotemporal patterns of thermal comfort in Azerbaijan using the Universal Thermal Climate Index (UTCI), revealing significant variations driven primarily by topographic diversity. The results demonstrate that elevation plays a crucial role in shaping thermal comfort conditions, with mountainous regions experiencing prolonged cold stress while lowland areas face moderate heat stress. The transitional seasons of spring and autumn exhibit the most favorable conditions for tourism, particularly in mid-elevation zones where thermal comfort persists longest. These findings highlight how Azerbaijan's complex relief creates distinct microclimates, enabling diverse tourism opportunities within relatively small geographical areas.

The research underscores three key recommendations for sustainable tourism development: First, tourism planning should adopt a seasonally differentiated approach that aligns activities with optimal thermal conditions. This involves concentrating outdoor cultural and nature-based activities during transitional seasons when comfort levels are highest, while developing climate-adapted solutions for peak summer and winter periods. Second, infrastructure development should incorporate bioclimatic design principles, prioritizing passive cooling strategies in warmer regions and thermal protection measures in colder zones. Third, destination management organizations should develop predictive models using UTCI data to anticipate shifting comfort zones under climate change scenarios.

Future studies could expand this work by integrating visitor perception data with physiological comfort metrics. Practical applications should focus on developing real-time comfort advisory systems and training programs for tourism operators on microclimate-aware service design. This UTCI-based framework provides policymakers with evidence to optimize resource allocation, ensuring tourism development aligns with regional bioclimatic advantages while mitigating thermal stress challenges.

Ultimately, the study establishes a replicable approach for balancing visitor comfort with environmental resilience in topographically diverse regions. The findings offer strategic insights for enhancing seasonal tourism offerings while maintaining ecological integrity across Azerbaijan's varied landscapes.

**Authors' contribution:** Gunesh Agakishiyeva – conceptualization, formal analysis, methodology; Emil Jabrayilov – conceptualization, methodology, writing (original draft), analysis of results; Jahan Mammadova – data validation, writing (review and editing).

**References**

Ayyubov, A. J. (1987). *Climate of resorts and recreation areas of the Azerbaijan SSR*. Azerneshr, 93 [in Azerbaijani]. [Əyyubov, Ə.C. (1987). *Azərbaycan SSR-in kurort və istirahət yerlərinin iqlimi*. Azərnəşr, 93].

Baaghideh, M., Mayvaneh, F., Shekari Badi, A., & Shojaee, T. (2016). Evaluation of human thermal comfort using UTCI index: case study Khorasan Razavi, Iran. *Natural Environment Change*, 2(2), 165–175.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012). Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515–535.

Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Fels, W., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56, 481–494.

Change, I. P. on C. (2007). *Climate change 2007: The physical science basis*. Agenda, 6(07), 333.

Daneshvar, M. R. M., Bagherzadeh, A., & Tavousi, T. (2013). Assessment of bioclimatic comfort conditions based on Physiologically Equivalent Temperature (PET) using the RayMan Model in Iran. *Central European Journal of Geosciences*, *5*(1), 53–60.

Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H. L., & Pappenberger, F. (2021). ERA5-HEAT: A global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. *Geoscience Data Journal*, 8(1), 2–10. https://doi.org/10.1002/gdj3.102

Di Napoli, C., Pappenberger, F., & Cloke, H. L. (2018). Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 62(7), 1155–1165.

Jabrayilov, E. A. (2022). Monitoring of Fragile Ecosystems with Spectral Indices Using Sentinel-2A MSI Data in Shahdagh National Park. *Geography, Environment, Sustainability*, 15(1), 70–77.

Jendritzky, G., De Dear, R., & Havenith, G. (2012). UTCI–why another thermal index? *International Journal of Biometeorology*, 56, 421–428.

Kolotova, Ye. V. (1999). *Recreational resource science*. Tourist, 135 [in Russian]. [Колотова, Е.В. *Рекреационное ресурсоведение*. Турист, 135].

Kotlyarova, O. V. (2020). *Theory and methodology of recreational geography*. Publishing Center of SUSU, 128 [in Russian]. [Котлярова, О.В. (2020). *Теория и методология рекреационной географии*. Издательский центр ЮУрГУ, 128].

Kruzhalin, V. I., Mironenko, N. S., Siegern-Korn, N. V., & Shabalina, N. V. (2014). *Geography of tourism*. Federal Agency for Tourism, 336 [in Russian]. [Кружалин, В.И., Мироненко, Н.С., Зигерн-Корн, Н.В., Шабалина, Н.В. (2014). *География туризма*. Федеральное агентство по туризму, 336].

Kuskov, A. S., Golubeva, V. L., & Odintsova, T. N. (2005). *Recreational geography*. MPSI, Flinta, 496 [in Russian]. [Кусков, А.С., Голубева, В.Л., Одинцова, Т.Н. (2005). *Рекреационная география*. МПСИ, Флинта, 496].

Matzarakis, A. (2006). Weather- and climate-related information for tourism. *Tourism and Hospitality Planning & Development*, 3(2), 99–115.

National Atlas of the Republic of Azerbaijan. (2014). *National Atlas of the Republic of Azerbaijan*. Baku Cartography Factory, 444.

Nepomnyaschiy, V. V., & Makeeva, E. G. (2025). The Role of Climatic Resources in the Formation of the Recreational Potential of the Republic of Khakassia. *Regional Geosystems*, 49(2), 319–336 [in Russian]. [Непомнящий, В.В., Макеева, Е.Г. (2025). Роль климатических ресурсов в формировании рекреационного потенциала Республики Хакасия. *Региональные геосистемы*, 49(2), 319–336]. https://reg-geosystems-journal.ru/index.php/journal/article/view/266/271

Pantavou, K., Theoharatos, G., Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (2013). Outdoor thermal sensation of pedestrians in a Mediterranean climate and a comparison with UTCI. *Building and Environment*, 66, 82–95.

Pashkov, S., Mazhitova, G., Sedelnikov, I., Ospan, G., & Sagatbayev, Y. (2023). Assessment of tourism and climate potential of territories of Northern Kazakhstan. *Geo Journal of Tourism and Geosites*, 48(4), 725–732.

Rutty, M., & Scott, D. (2014). Thermal range of coastal tourism resort microclimates. *Tourism Geographies*, 16(3), 346–363.

Scott, D. (2006). Global environmental change and mountain tourism. In *Tourism and global environmental change* (pp. 54–75), Routledge.

**Отримано редакцією журналу / Received: 02.09.25**
**Прорецензовано / Revised: 06.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Гюнеш АГАКІШІЄВА, канд. геогр. наук, доц.**
**ORCID ID: 0000-0002-8200-7278**
**e-mail: guneshagakishiyeva@gmail.com**
**Інститут географії, Міністерство науки та освіти, Баку, Азербайджан**

**Еміль ДЖАБРАЙЛОВ, наук. співроб.**
**ORCID ID: 0000-0001-9391-4319**
**e-mail: emil.jabrayilov@gmail.com**
**Інститут географії, Міністерство науки та освіти, Баку, Азербайджан**

**Джахан МАММАДОВА, канд. геогр. наук**
**ORCID ID: 0009-0002-1750-1664**
**e-mail: guneshagakishiyeva@gmail.com**
**Азербайджанський державний педагогічний університет, Баку, Азербайджан**

## ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ В АЗЕРБАЙДЖАНІ

**В с т у п .** ***Розуміння просторово-часових закономірностей теплового комфорту має вирішальне значення для розробки стратегій сталого туризму в географічно різноманітних регіонах. Це комплексне дослідження вивчає складні біокліматичні умови Азербайджану за допомогою Універсального теплового кліматичного індексу (UTCI), з особливим акцентом на те, як вражаюча топографічна різноманітність країни – від узбережжя Каспійського моря до гірських зон – створює різні мікроклімати, які впливають на комфорт відвідувачів та туристичний потенціал. Оскільки зміна клімату продовжує змінювати теплове середовище в усьому світі, це дослідження надає критично важливі базові дані для адаптивного планування туризму в перехідних кліматичних зонах.***

**М е т о д и .** ***У дослідженні використовувалися дані повторного аналізу ERA5-HEAT для розрахунку значень UTCI, включаючи чотири ключові метеорологічні параметри: температуру повітря, відносну вологість, швидкість вітру та середню радіаційну температуру. Розширені методи просторового аналізу було впроваджено за допомогою ArcGIS, включаючи інтерполяцію для створення безперервних поверхонь UTCI, зональну статистику для регіональних порівнянь та корекції на основі висоти з використанням даних SRTM 30 m DEM.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***Аналіз виявив екстремальні річні коливання UTCI (від –21,0 °C у високогір'ї у січні до 28,4 °C у низовинах у серпні), що демонструє виняткове біокліматичне різноманіття Азербайджану. Гірські регіони (Великий та Малий Кавказ) демонстрували тривалий холодовий стрес (UTCI <0 °C протягом 4–5 місяців), тоді як низовини (рівнина Кура-Аракс, узбережжя Каспійського моря) зазнавали значного літнього теплового стресу (UTCI >26 °C протягом 60–90 днів). Оптимальні умови теплового комфорту (UTCI 9–26 °C) були найбільш стійкими навесні (квітень–травень) та восени (вересень–жовтень), особливо на середніх висотах (500–1000 м).***

**В и с н о в к и .** ***Це дослідження демонструє, що моделі теплового комфорту Азербайджану фундаментально визначаються топографічними факторами. Отримані результати дають змогу здійснювати точне планування туризму з урахуванням клімату: культурний та пляжний туризм у низовинах протягом міжсезоння (квітень–червень, вересень–жовтень), гірський туризм у гірських зонах влітку та зимові види спорту у високогірних районах. Розроблена тут структура на основі UTCI виявляється особливо цінною для управління екстремальними термальними навантаженнями як у жаркому, так і в холодному середовищі. Ці результати мають безпосереднє практичне застосування для розвитку туристичної інфраструктури, сезонних маркетингових стратегій та планування адаптації до зміни клімату.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***UTCI, Азербайджан, тепловий комфорт, туристична кліматологія, топографічний вплив, сталий туризм.***

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

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

# ЕКОНОМІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.8.056
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.15

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

Ольга БІЛЯВСЬКА[1], канд. екон. наук
ORCID ID: 0000-0002-9945-957X
e-mail: olha.biliavska@knu.ua

Дмитро БАБЧУК[1,2], асп.
ORCID ID: 0009-0009-5918-2148
e-mail: dmytro-babchuk@ukr.net

Юлія БАБЧУК[1,2], канд. філос. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0003-1495-3112
e-mail: julya_babchuk@ukr.net

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
[2]Національна академія СБУ, Київ, Україна

# КРИТИЧНІ МАТЕРІАЛИ В КОНТЕКСТІ ПРОГРАМИ UKRAINE FACILITY ТА ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником Олександром МЕНЬШОВИМ*)

***Присвячено комплексному аналізу ролі критичних сировинних матеріалів (КСМ) України у контексті стратегічної автономії Європейського Союзу та його цілей зеленого й цифрового переходу. Визначено, що інтеграція багатих мінеральних ресурсів України, що підтримується ініціативами, такими як Програма Ukraine Facility, може суттєво зміцнити стійкість європейських ланцюгів постачання КСМ, які є незамінними для сучасних технологій. Окреслюються виклики та майбутні перспективи для інтеграції країни в європейський ланцюг створення вартості сировинних матеріалів. Наукова новизна полягає в міждисциплінарному підході, що поєднує геополітичні, економічні та геологічні аспекти для розв'язання проблеми КСМ в Україні, пропонуючи шляхи подолання залежності від застарілих даних, верифікації запасів критичних/стратегічних корисних копалин в Україні та залучення інвестицій.***

**Ключові слова:** ***Ukraine facility, критичні сировинні матеріали (КСМ), зелений цифровий перехід, Закон про критичні сировинні матеріали (CRMA), верифікації запасів критичних/стратегічних корисних копалин.***

## Вступ

***Основною метою*** цієї статті є всебічний аналіз ролі потенціалу критичних сировинних матеріалів (КСМ) України в контексті стратегічної автономії Європейського Союзу та його цілей зеленого переходу. Стаття прагне роз'яснити, як інтеграція багатих мінеральних ресурсів України, що полегшується такими ініціативами, як Програма Ukraine Facility, може значно посилити стійкість ланцюгів постачання КСМ для ЄС. Ці матеріали є незамінними для сучасних технологій та економічної стабільності. Мета цього дослідження формується з розуміння того, що критичні сировинні матеріали (КСМ) визначені Європейським Союзом як економічно та стратегічно важливі, але водночас пов'язані з високим ризиком постачання (European Commission, 2023a).

Прямий зв'язок між мінеральним потенціалом України та цілями стратегічної автономії та зеленого/цифрового переходу ЄС, підкреслений Програмою Ukraine Facility, перетворює це дослідження із суто геологічного на глибокий геополітичний та економічний імператив. Даючи відповідь на нагальну потребу як для післявоєнного відновлення України, так і для довгострокової безпеки та сталості ЄС.

***Наукова новизна*** цієї роботи полягає в її міждисциплінарному підході, що синтезує геополітичні, економічні та геологічні перспективи для розв'язання проблеми критичних сировинних матеріалів в Україні в рамках європейської інтеграції. Дослідження виходить за рамки загальних тверджень про мінеральне багатство України, критично аналізуючи наслідки залежності від історичних даних (оцінок радянської епохи) та пропонуючи, як верифікація запасів критичних/стратегічних корисних копалин в Україні може надати необхідну оновлену, надійну та міжнародно-сумісну геологічну інформацію.

Науковий внесок полягає у пропозиції того, як заплановані реформи, які проводяться, та ті, що ще мають бути проведені в рамках програми розвитку Ukraine Facility, можуть посилити конкурентоспроможність України в рамках інтеграції до ЄС та, зокрема, інтеграції багатих мінеральних ресурсів України як економічно та стратегічно важливих у внутрішній ринок ЄС.

Це перетворює теоретичний потенціал на практичні можливості, що є важливим внеском у післявоєнне відновлення України та її європейську інтеграцію.

***Огляд існуючої літератури та наукових досліджень*** вказує на значний інтерес до теми критичних сировинних матеріалів та їхнього значення для глобальної економіки та геополітики, а також зростаючу увагу до ролі України як потенційного постачальника. Дослідники та аналітики широко обговорюють геополітичні наслідки ланцюгів постачання КСМ, відзначаючи значну залежність ЄС від обмеженої кількості країн та ризики, що створюються цією залежністю.

Серед ключових дослідників, які активно вивчали та коментували мінеральне багатство України, можна виділити:

- *Ізабелла Гуревич (ifo Institute, EconPol Europe).* Її аналіз підкреслює запаси України для двох третин з 34 критичних сировинних матеріалів та наголошує на необхідності інвестицій у переробку, а не лише у видобуток.

© Вижва Сергій, Білявська Ольга, Бабчук Дмитро, Бабчук Юлія, 2025

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

• *Доктор Роберт Маґґа (SecDev).* Підкреслював "стратегічний та економічний вимір" окупації Росією українських мінеральних родовищ, що впливає на глобальні ланцюги постачання.

• *Роман Опімах (колишній голова Державної служби геології та надр України).* Часто цитується за його розуміння мінерального потенціалу України, залежності від даних радянської епохи та необхідності значних інвестицій, особливо для літію та графіту. Він також обговорював потенціал партнерства зі США.

• *Уляна Науменко, Віктор Мацуй, Олексій Науменко (Інститут геологічних наук НАН України).* Їхні дослідження зосереджені на застосуванні унікальних та рідкісноземельних елементів в Україні, виявленні первинних джерел та наголошенні на необхідності подальших досліджень та безвідходних технологій.

• *Володимир Михайлов, Сергій Вижва, Сергій Паюк (ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, ДКЗ України).* В ряді фундаментальних робіт і наукових публікацій визначали перспективи і інвестиційну привабливість практично всіх основних видів корисних копалин України, розробили універсальні критерії оцінки їх економічної перспективності.

Наявність усталених академічних та науково-дослідних інституцій в Україні, з активними дослідниками у галузі розвідки мінеральних ресурсів, свідчить про наявність потужного вітчизняного наукового потенціалу. Цей інтелектуальний капітал є критично важливим для післявоєнного відновлення України та її інтеграції в європейські ланцюги створення вартості. Він може забезпечити необхідні сучасні геологічні та геофізичні оцінки для залучення міжнародних інвестицій та забезпечення сталого розвитку ресурсів.

*Передумови, визначення та значення критичних сировинних матеріалів для ЄС.* Критичні сировинні матеріали (КСМ) є фундаментальним елементом сучасної європейської економіки. Вони визначаються як матеріали, що мають високу економічну та стратегічну важливість для Європейського Союзу, але водночас пов'язані з високим ризиком постачання (Ziebarth, 2025). Цей ризик постачання значною мірою зумовлений високою залежністю ЄС від імпорту та надзвичайною концентрацією видобутку, переробки або виробництва цих матеріалів в обмеженій кількості країн. Наприклад, у 2023 р. Європа була сильно залежна від неєвропейських джерел для багатьох критичних матеріалів, отримуючи 99 % бору з Туреччини та 100 % ключових рідкісноземельних елементів з Китаю (Ziebarth, 2025).

Значення КСМ для ЄС неможливо переоцінити, оскільки вони є основою для ключових галузей промисловості. Ці матеріали є критично важливими для таких секторів, як споживча електроніка, екологічні технології, автомобільна промисловість, аерокосмічна галузь, оборона, охорона здоров'я та металургія. Вони є "фундаментом економіки 21 століття" (Ziebarth, 2025). Наприклад, галій використовується в сонячних панелях, літій – у батареях, бор – у вітрових турбінах, а вольфрам – в аерокосмічній промисловості (European Commission, 2023b).

Особливо важлива роль КСМ у досягненні цілей ЄС щодо зеленого та цифрового переходів. Ці матеріали потрібні для технологій, що підтримують ці трансформації, зокрема для досягнення цілей щодо нульових викидів вуглецю, як-от вітрові турбіни та електромобілі (European Commission, 2023b). Масштаби зростання попиту на КСМ вражають: за оцінками, виробництво типового електромобіля потребує в шість разів більше мінеральних ресурсів, ніж звичайного автомобіля, а наземна вітрова електростанція – в дев'ять разів більше, ніж газова. Прогнозується, що попит ЄС на рідкісноземельні метали зросте в шість разів до 2030 р. і в сім разів до 2050 р., а на літій – у дванадцять разів до 2030 р. і у двадцять один раз до 2050 р. (Ziebarth, 2025).

Швидке зростання попиту на критичні сировинні матеріали, спричинене амбітними цілями ЄС щодо зеленого та цифрового переходу, не просто збільшує потребу в цих матеріалах, а прискорює її безпрецедентними темпами (European Commission, 2025a). Це швидке зростання попиту, у поєднанні з існуючими ризиками у ланцюгах постачання, створює критичний стратегічний імператив для ЄС щодо диверсифікації джерел та зміцнення своїх ланцюгів створення вартості. Цей прямий причинно-наслідковий зв'язок підкреслює нагальність пошуку нових, надійних постачальників, таких як Україна, що є кандидатом у члени ЄС та прагне до інтеграції в його економічний простір.

*Закон ЄС про критичні сировинні матеріали (CRMA): цілі та стратегії.* У відповідь на зростаючі виклики у сфері постачання критичних сировинних матеріалів Європейський Союз ухвалив у 2023 р. Закон про критичні сировинні матеріали (CRMA). Цей всеосяжний нормативний акт спрямований на забезпечення безпечного та сталого постачання КСМ для європейської промисловості та значне зниження залежності ЄС від імпорту від окремих країн-постачальників. CRMA також прагне зміцнити внутрішні ланцюги постачання, підвищити стійкість до перебоїв та сприяти циркулярній економіці (European Commission, 2025a).

Закон встановлює чіткі орієнтири для внутрішніх потужностей ЄС до 2030 р.:

• щонайменше 10 % річного споживання стратегічних сировинних матеріалів має видобуватися всередині ЄС;

• щонайменше 40 % річного споживання має перероблятися всередині ЄС;

• щонайменше 25 % річного споживання має надходити з перероблених матеріалів;

• не більше 65 % річного споживання кожного стратегічного матеріалу на будь-якій стадії переробки має надходити з якоїсь третьої країни (Ziebarth, 2025).

Для досягнення цих цілей CRMA передбачає низку заходів та механізмів. Це включає спрощення процедур дозволів для стратегічних проєктів у ЄС, встановлюючи максимальні терміни у 27 місяців для видобувних проєктів та 15 місяців для переробних та утилізаційних об'єктів, що значно скорочує стандартні терміни. Закон також запроваджує моніторинг ланцюгів постачання та стрес-тестування для забезпечення їх стійкості, координує створення стратегічних запасів та накладає зобов'язання щодо готовності до ризиків на великі компанії, що виробляють стратегічні технології (European Commission, 2025a).

На міжнародному рівні Закон спрямований на зміцнення міжнародної співпраці та розвиток взаємовигідних партнерств з третіми країнами, включаючи ініціативи на кшталт "Critical Raw Materials Club" та розширення мережі угод про сталі інвестиційне сприяння та вільну торгівлю, що, зокрема, реалізовується в Україні через програму Ukraine Facility та асоціацію з ЄС.

Амбітні цілі CRMA щодо внутрішнього видобутку та переробки (10 та 40 % відповідно до 2030 р.), у поєднанні з метою диверсифікації (не більше 65 % з однієї країни) (Ziebarth, 2025), безпосередньо позиціонують Україну як ключового потенційного партнера. Значні ресурси України, у разі їх розробки, можуть суттєво сприяти

досягненню цих цілей, фактично розглядаючись як "вітчизняні" в рамках майбутнього єдиного ринку, тим самим захищаючи ЄС від зовнішніх шоків та посилюючи його стратегічну автономію. Це створює потужний стимул для ЄС інвестувати у мінеральний сектор України.

Мінерально-сировинна база України: ключові критичні матеріали. Україна володіє винятково багатими мінеральними ресурсами, які вважаються критично важливими для сучасних галузей промисловості. За оцінками, країна містить близько 5 % світових мінеральних ресурсів, з майже 20 000 родовищ, що охоплюють 116 типів руд. Загальна вартість цих мінеральних багатств за різними оцінками сягає від 3 до 15 трильйонів доларів США (Duggal, & Ali, 2025).

Незважаючи на значний потенціал, поточний видобуток більшості КСМ в Україні залишається дуже обмеженим. Значна частина геологічної інформації базується на застарілих радянських даних, зібраних у 1960–1980-х рр., відсутні сучасні оцінки запасів, що відповідають міжнародним стандартам. Крім того, в Україні бракує сучасних потужностей для переробки, що обмежує можливість експортувати не просто сиру руду, а продукти з більшою доданою вартістю, такі як літієві хімікати для батарей або очищений графіт (Georges, 2025).

Саме тому, з метою підготовки до аукціонів та тендерів, угод про розподіл продукції (далі – УРП), Україна зобов'язалась провести перевірку та переоцінку запасів критичних матеріалів і сировини за допомогою міжнародних систем класифікації (наприклад, РКООН, JORC). Проведення перевірок та переоцінки запасів критичних матеріалів і сировини за допомогою міжнародних систем класифікації, зокрема РКООН, можуть подолати критичний розрив між застарілими геологічними оцінками радянської епохи та нагальною потребою в надійних, сучасних даних для досягнення цілей Закону ЄС про критичні сировинні матеріали (CRMA). А це, зрештою, дасть змогу провести розблокування мінерального потенціалу України для міжнародних інвестицій та інтеграції. Відсутність сучасної оцінки є прямою перешкодою та створює суттєві бар'єри для залучення інвестицій (Шабельніков, 2025).

В рамках проведення реформ на реалізацію програми Ukraine Facility Держгеонадра та ДКЗ України проводять верифікацію запасів стратегічних/критичних корисних копалин в Україні (37 корисних копалин відповідно до рішення РНБО від 16.07.2021 р.) (Рада національної безпеки і оборони України, 2021).

Важливо відзначити, що, хоч Україна часто згадується як країна з одними з найбільших родовищ у Європі, наявна інформація також вказує на те, що ці запаси "переважно невикористані". Крім того, загальні "запаси" (економічно життєздатні) є менш значними, ніж "родовища" (геологічно наявні) (Gourevich, 2025). Це підкреслює критичну відмінність між геологічним потенціалом та доведеними, економічно обґрунтованими кількостями мінеральних ресурсів, що вказує на нагальну потребу в сучасній розвідці та економічній оцінці.

Тривала війна в Україні також безпосередньо впливає на доступність та розробку родовищ критичних мінералів. Росія активно захоплює та контролює значні частини мінеральних багатств України, особливо у східних регіонах. Це територіальний контроль не лише позбавляє Україну життєво важливих доходів для її відновлення, але й надає Росії стратегічний вплив на глобальні ланцюги постачання. Наприклад, у 2022 р., за оцінками SecDev, Росія окупувала 63 % українських вугільних шахт, а також половину її запасів марганцю, цезію, танталу та рідкісноземельних елементів (Gourevich, 2025).

Програма Ukraine Facility та її роль у розвитку мінерально-сировинної бази.

Програма Ukraine Facility є ключовим інструментом у стратегії Європейського Союзу, що передбачає надання Україні до 50 млрд євро стабільної та передбачуваної фінансової підтримки на період з 2024 по 2027 рр. Основними цілями цієї програми є підтримка відновлення, відбудови та модернізації України, забезпечення її фінансових потреб для безперебійного надання державних послуг, мобілізація інвестицій у приватний сектор (очікується до 50 млрд євро) та сприяння реформам на шляху до членства в ЄС (European Commission, 2024a).

Досягнення зазначених цілей планується шляхом реалізації базових реформ, що зміцнюють державні інституції, систему управління та верховенство права, запровадження економічних реформ, спрямованих на розвиток бізнес-середовища, залучення інвестицій і розширення зайнятості та інтегрування в усі напрямки реформування: зелений перехід, цифрову трансформацію та європейську інтеграцію.

Окрема стратегія передбачає пріоритетність секторального розвитку з орієнтацією на ті сфери, що здатні забезпечити мультиплікативний ефект для всієї економіки та посилити позиції України на глобальних ринках. Одним із таких пріоритетів є сектор критичних матеріалів і сировини. Розвиток цього сектору здатен забезпечити стале економічне зростання та підвищити роль України у глобальних ланцюгах постачання.

Інструментами реалізації модернізації сектору має стати: розвиток сучасних технологій видобутку та переробки критичних матеріалів; запровадження прозорих і швидких процедур для інвесторів; виконання стандартів ESG (екологічна, соціальна та управлінська відповідальність) та формування стимулів для виробництва кінцевої технологічної продукції з високою доданою вартістю.

Очікуваний ефект від реформування та модернізації сфери критичних матеріалів, окрім створення нових робочих місць та зміцнення позицій України на світовому ринку корисних копалин, це ще й посилення економічної стійкості зі зростанням внеску критичних матеріалів у ВВП країни та інтеграція України у внутрішній ринок ЄС як рівноправного гравця та партнера.

Секторальний розвиток у сфері критичних матеріалів вимагає проведення комплексних реформ, спрямованих на модернізацію управлінських, технологічних та регуляторних процесів. Насамперед потребують удосконалення адміністративні процедури, пов'язані з формуванням портфеля інвестиційних проєктів, що забезпечить прозорість і швидкість ухвалення рішень для інвесторів. Важливим кроком є також запровадження відкритих і зрозумілих механізмів укладення угод про розподіл продукції, що стане запорукою зростання довіри бізнесу та міжнародних партнерів.

Окремої уваги потребує цифровізація та створення сучасних онлайн-інструментів для доступу до геоінформаційних ресурсів і сервісів регулятора. Це дасть змогу спростити роботу з даними, забезпечить їхню відкритість та поліпшить якість управлінських рішень.

Реформування галузі також передбачає широке впровадження інноваційних технологій видобутку та включення України до сучасних глобальних ланцюгів переробки і створення доданої вартості. Ключовим завданням тут є гармонізація нормативно-правової бази гірничодобувної промисловості з європейськими стандартами. Особливий акцент робиться на інтеграції принципів ESG (екологічних, соціальних та управлінських критеріїв), які повинні стати невід'ємною складовою всіх

етапів діяльності – від геологічних досліджень до промислового видобутку й переробки корисних копалин.

Реалізація цих реформ дасть змогу не лише підвищити ефективність функціонування сектору, а й сформувати умови для його довгострокової стійкості, прозорості та інтеграції у внутрішній ринок ЄС.

Прямий зв'язок Програми Ukraine Facility з розвитком мінерально-сировинної бази України підкреслюється законодавчими змінами. Закон України "Про внесення змін до Національної програми розвитку мінерально-сировинної бази України до 2030 року" спрямований на імплементацію заходів, передбачених Планом України (Ukraine Facility), зокрема в контексті стратегічних та критичних корисних копалин. Це включає запровадження визначень мінералів та компонентів стратегічного та критичного значення, а також встановлення спеціальних процедур для отримання права на користування надрами через аукціони (Shulima, & Yaliieva, 2025).

Стратегічне узгодження між Програмою Ukraine Facility та цілями ЄС у сфері КСМ є очевидним. Тісніша інтеграція мінерально-сировинного сектору України може значно посилити ресурсну безпеку ЄС та зменшити залежність від домінуючих постачальників, що повністю відповідає цілям CRMA (European Commission, 2024a). Поставки з України як країни-кандидата на вступ до ЄС та близького партнера розглядаються як політично надійні та безпечні. У майбутньому єдиному ринку вони можуть бути трактовані майже як "вітчизняні" ресурси, що додатково захистить ЄС від зовнішніх потрясінь (Gourevich, 2025).

Програма Ukraine Facility надає критично важливу фінансову та політичну основу для зменшення ризиків та стимулювання інвестицій у сектор критичних сировинних матеріалів України. Шляхом явного зв'язку значної фінансової допомоги з реформами та інвестиціями у стратегічні мінерали, ЄС активно створює необхідні умови для того, щоб Україна стала надійним та безпечним джерелом, безпосередньо підтримуючи як післявоєнне відновлення України, так і стратегічну автономію ЄС. Це – потужний механізм для перетворення геополітичного узгодження на відчутні економічні переваги та переваги у сфері ресурсної безпеки.

*Стратегічне значення інтеграції українських ресурсів для ЄС.* Інтеграція мінеральних ресурсів України в ланцюги постачання Європейського Союзу має глибоке стратегічне значення, що виходить за межі простої економічної вигоди. Вона є ключовим елементом у посиленні стійкості та автономії ЄС у глобальному масштабі.

По-перше, це забезпечує критично важливу диверсифікацію поставок. ЄС нині значною мірою залежить від імпорту КСМ з обмеженої кількості країн, таких як Китай (для рідкісноземельних елементів) або Демократична Республіка Конго (для кобальту) (Ziebarth, 2025). Україна з її широким спектром критичних матеріалів, що лежать в основі зеленого та цифрового переходу, може стати значним альтернативним джерелом, зменшуючи цю геополітичну та економічну вразливість.

По-друге, це значно підвищує безпеку поставок. Статус України як країни-кандидата на вступ до ЄС та її географічна близькість роблять її політично надійним та безпечним партнером. Поставки з України можуть бути інтегровані в єдиний ринок ЄС, фактично розглядаючись як "майже вітчизняні" ресурси. Це створює додатковий рівень захисту для ЄС від зовнішніх шоків та перебоїв у постачанні, що є критично важливим в умовах зростаючої глобальної нестабільності (Gourevich, 2025).

По-третє, інтеграція українських ресурсів має значний геополітичний вплив. Посилення співпраці з Україною у сфері КСМ є частиною ширшої стратегії ЄС та США, спрямованої на зменшення домінування Китаю на ринку рідкісноземельних елементів та інших критичних матеріалів. Це дозволяє західним демократіям зміцнити свої позиції у глобальній конкуренції за ресурси та зменшити залежність від авторитарних режимів (Ziebarth, 2025).

*Таблиця 1*

**Інтеграція сектору КСМ України в ланцюги створення вартості ЄС**

| Завдання | Інструменти реалізації | Очікуваний ефект |
|---|---|---|
| Забезпечити стабільне та передбачуване постачання критичних ресурсів до ЄС | Участь у європейських програмах із формування безпечних ланцюгів постачання | Зміцнення енергетичної та промислової автономії Євросоюзу |
| Розвивати виробництво продукції з високою доданою вартістю для зменшення сировинної залежності | Розширення інвестиційних можливостей у видобуток і переробку | Зростання інвестицій і створення нових робочих місць |
| Синхронізувати українські стандарти із нормами ЄС у сфері видобутку, переробки та екологічної відповідальності | Впровадження ESG-стандартів у гірничодобувному секторі | Підвищення ролі України як надійного стратегічного партнера |
| Поглибити партнерство України та ЄС у сфері стратегічних ресурсів | Гармонізація законодавчої бази з нормами ЄС | Посилення економічної інтеграції України з ЄС |

Отже, українські ресурси розглядаються як стратегічний актив, здатний забезпечити взаємовигідну модель співпраці: з одного боку, – підтримка розвитку української економіки, з іншого – зміцнення автономії та стійкості ЄС у глобальному масштабі.

Інтеграція сектору КСМ України в ланцюги створення вартості ЄС являє собою глибоку геополітичну переорієнтацію. Це стратегічно переміщує частину залежності ЄС від критичних мінералів від потенційно нестабільних або ворожих режимів до географічно близької, політично узгодженої та прагнучої до членства держави. Це посилює стратегічну автономію та стійкість ЄС на дедалі мінливішому глобальному ринку ресурсів, перетворюючи Україну на наріжний камінь європейської ресурсної безпеки.

**Дискусія і висновки**

Аналіз мінерально-сировинної бази України та її потенційної ролі в забезпеченні критичних сировинних матеріалів для Європейського Союзу виявляє глибоку взаємозалежність та значні перспективи для обох сторін. Україна володіє винятковими запасами КСМ, включаючи літій, графіт, титан та рідкісноземельні елементи, які є життєво важливими для реалізації зеленого та цифрового переходів ЄС та зміцнення його стратегічної автономії.

Водночас виявлено, що значна частина цих ресурсів залишається невикористаною, а інформація про родовища часто базується на застарілих даних радянської епохи, що створює бар'єри для залучення міжнародних інвестицій. Триваюча війна ще більше ускладнює доступ до деяких ключових родовищ та створює ризики для інвестицій.

Програма Ukraine Facility та Закон ЄС про критичні сировинні матеріали створюють безпрецедентну можливість для України інтегруватися в європейський ланцюг постачання КСМ. Фінансова підтримка та інвестиційні механізми Ukraine Facility, у поєднанні з цілями CRMA щодо диверсифікації та внутрішнього виробництва, можуть стимулювати необхідні реформи та інвестиції в український видобувний та переробний сектор. Розвиток цього партнерства дозволить ЄС зменшити свою залежність від нестабільних постачальників, а Україні – залучити кошти для відновлення та модернізації.

Реалізація цього партнерства здатна стати каталізатором масштабних реформ у гірничодобувному та переробному секторах України, відкриваючи шлях до впровадження сучасних технологій, підвищення прозорості та відповідності міжнародним стандартам ESG. Водночас фінансові інструменти та інвестиції дадуть змогу не лише відновити виробничу інфраструктуру, а й здійснити її модернізацію, спрямовану на створення продукції з високою доданою вартістю та створити унікальне вікно можливостей для інтеграції України в європейські ланцюги постачання критичної сировини.

Ключову роль у розкритті цього потенціалу відіграватиме оновлення та верифікація запасів критичних/стратегічних корисних копалин в Україні, що дозволить отримати актуальні, точні та міжнародносумісні дані про українські родовища. Це критично важливо для перетворення геологічного потенціалу на економічно життєздатні запаси, що відповідають вимогам міжнародних інвесторів з метою підготовки до аукціонів та тендерів за угодами про розподіл продукції.

Рекомендації:

1. Пріоритетне проведення сучасних досліджень: необхідно терміново інвестувати у широкомасштабні дослідження ключових родовищ критичних сировинних матеріалів в Україні, особливо тих, що знаходяться на безпечних територіях. Це дасть змогу оновити геологічні дані та привести їх у відповідність до міжнародних стандартів (наприклад, РКООН).

2. Створення інтегрованих геолого-геофізичних баз даних: розробка централізованих, доступних та оновлюваних баз даних, що об'єднують історичні та нові геофізичні, геологічні та геохімічні дані, сприятиме ефективному плануванню розвідки та залученню інвестицій.

3. Розвиток переробних потужностей: паралельно з розвідкою необхідно залучати інвестиції у створення сучасних переробних підприємств в Україні, щоб максимізувати додану вартість видобутих матеріалів та інтегрувати Україну в середню ланку європейських ланцюгів постачання.

4. Зміцнення міжнародної співпраці у сфері R&D: поглиблення співпраці між українськими науковими установами та європейськими дослідницькими центрами та промисловими партнерами у сфері розробки нових технологій розвідки, видобутку та переробки КСМ.

5. Підготовка кадрів: розширення освітніх програм у галузі геофізики, геології та гірничої справи для підготовки висококваліфікованих фахівців, здатних працювати із сучасними технологіями та міжнародними стандартами.

6. Забезпечення прозорості та сприятливого інвестиційного клімату: продовження реформ у сфері надрокористування, спрямованих на зменшення адміністративного навантаження, забезпечення прозорості ліцензування та захисту інвестицій, що є критично важливим для залучення іноземного капіталу.

Реалізація цих рекомендацій дозволить Україні повною мірою реалізувати свій мінерально-сировинний потенціал, стати надійним та стратегічно важливим партнером для Європейського Союзу, що сприятиме як її власному сталому розвитку, так і зміцненню європейської ресурсної безпеки.

**Внесок авторів:** Сергій Вижва – ідея, критичний аналіз і підбір літературних джерел, редагування, висновки; Ольга Білявська – аналіз нормативних документів і фінансової складової, редагування; Дмитро Бабчук – концептуалізація, аналіз, написання. Юлія Бабчук – формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка).

**Список використаних джерел**

Shulima, A., Yaliieva, O. (2025). Amendments to the National Program for the Development of the Mineral and Raw Materials Base until 2030. *Юридична газета*. Retrieved from https://yur-gazeta.com/legal-business/articles-in-english/amendments-to-the-national-program-for-the-development-of-the-mineral-and-raw-materials-base-until-2.html

Ziebarth, D. (2025). *The European Union and Critical Raw Materials: Juggling Geopolitical and Economic Realities* (Trend Report, 9). Austrian Institute for International Affairs (pp. 2–7). https://www.oiip.ac.at/publikation/the-european-union-and-critical-raw-materials-juggling-geopolitical-and-economic-realities/

European Commission. (2023a). *Critical Raw Materials: ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661

European Commission. (2023b). *European Commission, Study on The Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report*. Publications Office of the European Union. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1

European Commission. (2024a). *Enlargement and Eastern Neighbourhood. Ukraine Facility*. https://enlargement.ec.europa.eu/funding-technical-assistance/ukraine-facility_en

European Commission. (2024b). *План для The Ukraine Facility* (2024–2027). https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/plan-ukraine-facility.pdf

European Commission. (2025a). *Critical Raw Materials Act*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en

European Commission. (2025b). *The Ukraine Facility. Supporting Ukraine's recovery, reconstruction and path towards EU accessions*. https://commission.europa.eu/topics/eu-solidarity-ukraine/eu-assistance-ukraine/ukraine-facility_en

Gourevich, I. (2025). *Strategic Raw Materials in Ukraine: Opportunities for Strengthening EU Supply Chains?* (EcoPol Policy Brief, 9(72), 1–13). Ifo Institute. https://www.ifo.de/DocDL/EconPol-PolicyBrief_72-Strategic-Raw-Materials-Ukraine.pdf

Duggal, H., & Ali, M. (2025). Mapping Ukraine's rare earth and critical minerals. *Al Jazeera*. https://www.aljazeera.com/news/2025/2/28/mapping-ukraines-rare-earth-and-critical-minerals

Georges, L. (2025). Ukraine rare earths potential relies on Soviet assessment, may not be viable. *SP Global*. https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/articles/2025/2/ukraine-rare-earths-potential-relies-on-soviet-assessments-may-not-be-viable-87318842

Михайлов, В. А. (2023). *Стратегічні корисні копалини України та їхня інвестиційна привабливість*. ВПЦ "Київський університет". https://www.geology.knu.ua/media/library/docs/Stratehichni_Korysni_Kopalyny_qmWEkMu.pdf

Михайлов, В., Вижва, С., & Паюк, С. (2022). Системний аналіз мінерально-сировинної бази стратегічних корисних копалин України. *Вісник Київського університету. Геологія*, 99(4), 36–44. https://doi.org/10.17721/1728-2713.99.05

Михайлов, В. А., Омельчук, О. В., Загнітко, В. М., & Курило, М. М. (2023). *Пошуки та розвідка родовищ корисних копалин*. ВПЦ "Київський університет". https://www.geology.knu.ua/media/library/docs/Poshuky_Rozvidka_Rodovyshch.pdf

Науменко, У., Мацуй, В., & Науменко, О. (2024). Дослідження та застосування рідкісних і рідкісноземельних елементів в Україні: шлях до інновацій та сталого розвитку. *GeoBio*, 26, 95–103. https://www.researchgate.net/publication/388219423_Research_and_application_of_unique_and_rare_earth_elements_in_Ukraine_the_way_to_innovation_and_sustainable_development

Рада національної безпеки і оборони України. (2021). *Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави.* Указ Президента України № 153/2021. https://www.rnbo.gov.ua/ua/Ukazy/4935.html

Шабельніков, А. (2025). Інвестиційний клімат в Україні: виклики та перспективи 2025 року. *Юридична газета*. https://yur-gazeta.com/dumka-eksperta/investiciyniy-klimat-v-ukrayini-vikliki-ta-perspektivi-2025-roku.html

**References**

Shulima, A., Yaliieva, O. (2025). Amendments to the National Program for the Development of the Mineral and Raw Materials Base until 2030. *Legal newspaper*. https://yur-gazeta.com/legal-business/articles-in-english/amendments-

to-the-national-program-for-the-development-of-the-mineral-and-raw-materials-base-until-2.html

Duggal, H., & Ali, M. (2025). Mapping Ukraine's rare earth and critical minerals. *Al Jazeera*. https://www.aljazeera.com/news/2025/2/28/mapping-ukraines-rare-earth-and-critical-minerals

European Commission. (2023a). *Critical raw materials: Ensuring secure and sustainable supply chains for EU's green and digital future*. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1661

European Commission. (2023b). *European Commission, Study on the critical raw materials for the EU 2023 – Final report*. Publications Office of the European Union. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/57318397-fdd4-11ed-a05c-01aa75ed71a1

European Commission. (2024a). *Enlargement and Eastern Neighbourhood. Ukraine Facility*. https://enlargement.ec.europa.eu/funding-technical-assistance/ukraine-facility_en

European Commission. (2024b). *Plan for The Ukraine Facility* (2024–2027) [in Ukrainian]. https://www.ukrainefacility.me.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/plan-ukraine-facility.pdf

European Commission. (2025a). *Critical Raw Materials Act*. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en

European Commission. (2025b). *The Ukraine Facility. Supporting Ukraine's recovery, reconstruction and path towards EU accessions*. https://commission.europa.eu/topics/eu-solidarity-ukraine/eu-assistance-ukraine/ukraine-facility_en

Georges, L. (2025). Ukraine rare earths potential relies on Soviet assessment, may not be viable. *SP Global*. https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/articles/2025/2/ukraine-rare-earths-potential-relies-on-soviet-assessments-may-not-be-viable-87318842

Gourevich, I. (2025). *Strategic raw materials in Ukraine: Opportunities for strengthening EU supply chains?* (EcoPol Policy Brief, 9(72), 1–13). Ifo Institute. Retrieved from https://www.ifo.de/DocDL/EconPol-PolicyBrief_72-Strategic-Raw-Materials-Ukraine.pdf

Mykhaylov, V. A. (2023a). *Strategic mineral resources of Ukraine and their investment attractiveness*. VPC "Kyiv University". https://www.geology.knu.ua/media/library/docs/Stratehichni_Korysni_Kopaly ny_qmWEkMu.pdf

Mykhaylov, V. A., Omelchuk, O. V., Zagnitko, V. M., & Kurylo, M. M. (2023b). *Search and exploration of mineral deposits*. PPC "Kyiv University" [in Ukrainian]. https://www.geology.knu.ua/media/library/docs/Poshuky_Rozvidka_Rodovyshch.pdf [in Ukrainian].

Mykhaylov, V. A., Vyzhva, S. A., & Paiuk, S. (2022). System analysis of the mineral raw material base of strategic minerals of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, *99*(4), 36–44. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.17721/1728-2713.99.05

National Security and Defense Council of Ukraine. (2021). *On stimulating the search, extraction and enrichment of minerals that are of strategic importance for the sustainable development of the economy and the defense capability of the state* [in Ukrainian]. https://www.rnbo.gov.ua/ua/Ukazy/4935.html

Naumenko, U., Matsui, V., & Naumenko, O. (2024). Research and application of rare and rare earth elements in Ukraine: The path to innovation and sustainable development. *GeoBio*, 26, 95–103. https://www.researchgate.net/publication/388219423_Research_and_application_of_unique_and_rare_earth_elements_in_Ukraine_the_way_to_innovation_and_sustainable_development

Shabelnikov, A. (2025). Investment climate in Ukraine: Challenges and prospects for 2025. *Yurydychna Gazeta*. https://yur-gazeta.com/dumka-eksperta/investiciyniy-klimat-v-ukrayini-vikliki-ta-perspektivi-2025-roku.html

Ziebarth, D. (2025). *The European Union and critical raw materials: Juggling geopolitical and economic realities* (Trend Report, 9, pp. 2–7). Austrian Institute for International Affairs. https://www.oiip.ac.at/publikation/the-european-union-and-critical-raw-materials-juggling-geopolitical-and-economic-realities/

**Отримано редакцією журналу / Received: 01.09.25**
**Прорецензовано / Revised: 07.10.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

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

**Olha BILIAVSKA[1], PhD (Econ.)**
**ORCID ID: 0000-0002-9945-957X**
**e-mail: olha.biliavska@knu.ua**

**Dmytro BABCHUK[1], PhD Student**
**ORCID ID: 0009-0009-5918-2148**
**e-mail: dmytro-babchuk@ukr.net**

**Yuliia BABCHUK[1,2], PhD (Philos.), Assoc. Prof.**
**ORCID ID: 0000-0003-1495-3112**
**e-mail: julya_babchuk@ukr.net**

**[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine**
**[2]National Academy of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine**

# CRITICAL RAW MATERIALS IN THE CONTEXT OF THE UKRAINE FACILITY PROGRAM AND EUROPEAN INTEGRATION

***This academic article offers a comprehensive analysis of the role of critical raw materials (CRMs) in Ukraine within the context of the European Union's strategic autonomy and its goals of a green and digital transition. It's been determined that integrating Ukraine's rich mineral resources, supported by initiatives like the Ukraine Facility Program, can significantly strengthen the resilience of European CRM supply chains, which are essential for modern technologies. The article outlines challenges and future prospects for the country's integration into the European raw materials value chain. The scientific novelty lies in its interdisciplinary approach, which combines geopolitical, economic, and geological aspects to address the CRM issue in Ukraine. It proposes ways to overcome reliance on outdated data, verify the reserves of critical/strategic minerals in Ukraine, and attract investments.***

**K e y w o r d s** ***: Ukraine Facility, critical raw materials (CRMs), green digital transition, Critical Raw Materials Act (CRMA), verification of critical/strategic mineral reserves.***

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

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

# ОГЛЯД

УДК 624.131:551.435.6(477-25)
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.111.16

Тетяна КРІЛЬ, канд. геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0002-4324-9231
e-mail: kotkotmag@gmail.com
Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

Антон СТРЕЛЬЦОВ, асп.
ORCID ID: 0009-0008-5394-8731
e-mail: streltsov.kiev.ua@gmail.com
Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

# ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНІ УМОВИ ДНІПРОВСЬКИХ СХИЛІВ ЦЕНТРАЛЬНОГО АРЕАЛУ КИЄВА: РЕТРОСПЕКТИВА ДОСЛІДЖЕНЬ ТА АНАЛІЗ ЧИННИКІВ ЗСУВНОЇ НЕБЕЗПЕКИ

(*Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. Оленою ІВАНІК*)

**В с т у п .** ***Представлено результати аналізу інженерно-геологічних умов дніпровських схилів у межах центрального історичного ареалу міста Києва. Основною метою дослідження є виявлення природних та антропогенних чинників, що впливають на розвиток зсувних процесів, а також формування сучасного уявлення про умови забезпечення стійкості природної системи досліджуваної території.***

**М е т о д и .** ***Для встановлення динаміки розвитку зсувних процесів на дніпровських схилах Києва використано ретроспективний аналіз зсувонебезпечних ділянок, зокрема фотофіксації сучасного стану схилу та порівнянням фотографій з архівних джерел. Аналіз інженерно-геологічних умов та чинників розвитку зсувних зрушень на схилах проводився з використанням аналітичних, статистичних, картографічних методів. Для побудови картографічних моделей використано геоінформаційні системи (застосунки ArcGIS, Surfer). Інженерно-геологічні розрізи побудовано засобами AutoCAD.***

**Р е з у л ь т а т и .** ***Систематизовано періоди наукових досліджень зсувної небезпеки дніпровських схилів та робіт з їх укріплення, виділено п'ять ключових етапів досліджень, включаючи сучасні з часів незалежності України. На основі уявлень про чинники формування зсувних зрушень на території досліджень виділено три ділянки, дано їх інженерно-геологічну характеристику, виділено ділянки з найвищим рівнем зсувонебезпеки за величиною кута нахилу 15–25°, які займають 25–34 % по площі залежно від ділянки схилу (Давнього Києва, Центральної, Залаврської). Встановлено, що найбільший вплив на зниження стійкості системи схилів мають такі чинники: водонасичення ґрунтів (атмосферними опадами, витоками з мереж водогону), привантаження схилів у процесі забудови, інженерні втручання без урахування інженерно-геологічних особливостей та динамічні навантаження (транспорт, будівельні роботи). Проаналізовано сукупний вплив зазначених чинників і систематизовано наслідки їх взаємодії, що призводять до втрати стійкого стану схилу.***

**В и с н о в к и .** ***На основі результатів сформульовано напрямки концептуальних засад системного підходу до забезпечення стійкості дніпровських схилів, що передбачають узгоджене застосування інженерно-геологічного моніторингу, актуалізації інженерно-геологічного районування дніпровського схилу та ранжування за рівнем ризиків зсувної небезпеки, опрацювання принципів раціонального містобудівного планування на схилах та оптимізації протизсувних заходів з обов'язковим урахуванням історико-культурної цінності досліджуваної території.***

**К л ю ч о в і  с л о в а :** ***інженерно-геологічні умови, дніпровські схили, зсуви, чинники зсувної небезпеки, історичні ареали.***

## Вступ

Центральний історичний ареал м. Києва відіграє визначальну роль в історико-культурному сенсі розвитку України та має домінантне положення в ландшафті міста. Ця територія (між Дніпром і його правою притокою р. Либідь) містить об'єкти культурної та природної спадщини і пов'язані з ними розташування та форму забудови, які походять з попередніх періодів розвитку. Ареал становить на сьогодні трохи більше 5 % території міста і входить майже повністю в Печерській і частково в Шевченківський, Подільський, Солом'янський та Голосіївський адміністративні райони Києва (рис. 1).

У визначені межі історичного центру вкладається територія, що в геоструктурному плані розташована на північно-східному схилі Українського щита, в геоморфологічному плані виходить на стик морено-зандрової рівнини і Київського лесового плато, що обмежуються схилами долин Дніпра і Либіді, їх притоками – річками, балками, ярами (Барщевский, Купраш, & Швыдкий, 1989; Інститут геологічних наук НАН України, 2006).

У межах цієї території розташовані заповідники – об'єкти Всесвітньої культурної спадщини: Національний історико-культурний Києво-Печерський заповідник, Державний історико-культурний заповідник "Софія Київська" з філіями – Кирилівським монастирем у межах садиби Кирилівської церкви та Андріївською церквою на Андріївському узвозі (UNESCO, 2024), Державний історико-культурний заповідник "Стародавній Київ", пам'ятник Магдебурзькому праву (Про Перелік пам'яток..., 2008; Міністерство культури та стратегічних комунікацій України, 2024, 2025). У цій частині міста виділяються також зони природно-історичного ландшафту. Це, зокрема, територія правобережних схилів долини Дніпра, ландшафтні комплекси гір Старокиївської, Хоревиці (Замкової, Киселівки), Щекавиці, Андріївської, Михайлівської, Володимирської, Юрковиці, Липок, Печерська, Видубичів, залишки фортечних валів і ровів Подільських і Печерських фортечних укріплень (Історико-архітектурний опорний план м. Києва, 2015).

Об'єкти історико-культурного значення центрального історичного ареалу м. Києва перебувають у різних геоморфологічних і морфометричних умовах, найнебезпечнішими з яких є схили, зокрема правобережної частини р. Дніпро, де широкого розвитку набували ерозійно-гравітаційні процеси та періодично активізувались зсуви. Зсувні руйнування дніпровських схилів завжди

© Кріль Тетяна, Стрельцов Антон, 2025

становили серйозну проблему для м. Києва. Перші відомості про зсуви в районі м. Києва наводяться в літописах XI–XII ст. Наукове вивчення гравітаційних зрушень на схилах проводиться з XIX ст. У вивченні зсувів, розробці заходів для їх прогнозування, запобігання їм брали участь відомі геологи, гідрогеологи, гідротехніки та інженери-будівельники: М. Барбот-де-Марні, К. М. Феофілактов, О. П. Павлов, П. А. Тутковський, П. Я. Армашевський, С. Г. Коклик, Б. Л. Лічков, В. М. Чирвінський, Л. С. Лічков, Є. В. Опоков, В. І. Лучицький, Р. Р. Виржиківський, М. Ф. Погребов, А. Н. Козловська, М. В. Фремд, Л. Г. Каманін, І. М. Киричко, О. І. Спасокукоцький, А. М. Дранніков, Є. П. Ємельянова, Ф. В. Котлов, В. Ф. Краєв, М. Г. Демчишин, М. В. Кондратенко, Ю. М. Марчук, О. Г. Головань, О. С. Штекель та ін.

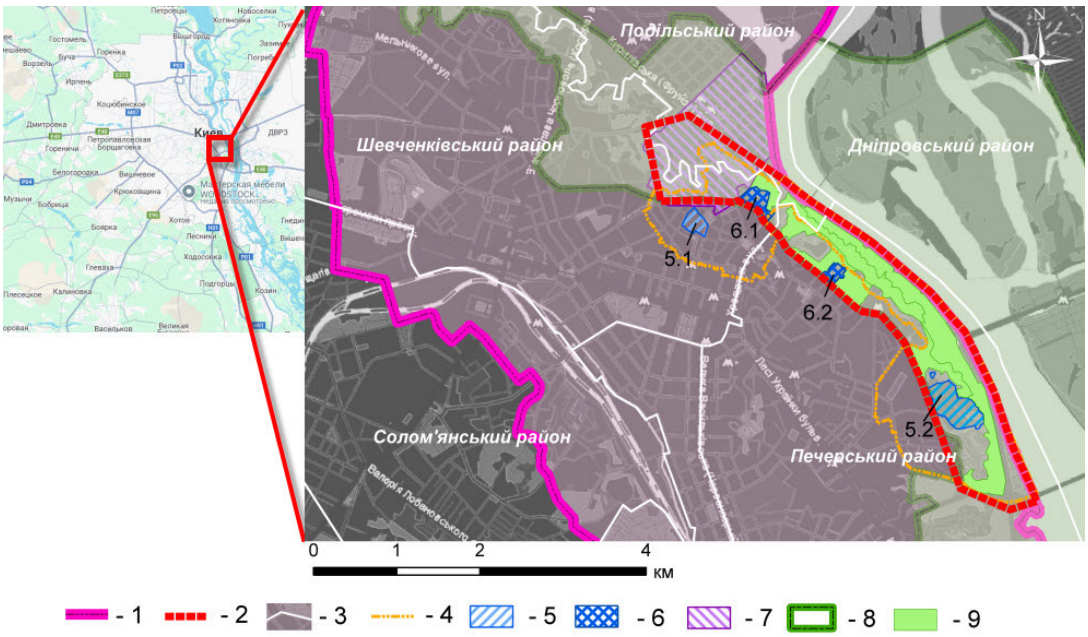



**Рис. 1. Центральна історична частина дніпровських схилів м. Києва:**
1 – Центральний історичний ареал; 2 – межі досліджень; 3 – райони міста; 4 – буферна зона об'єктів всесвітньої спадщини ЮНЕСКО згідно з планом (Історико-архітектурний опорний план м. Києва, 2015); 5 – об'єкти всесвітньої спадщини ЮНЕСКО, де 5.1 – Національний історико-культурний заповідник "Софія Київська", 5.2 – Національний заповідник "Києво-Печерська лавра" (UNESCO, 2024); 6 – архітектурні заповідники Національного значення, де 6.1 – "Михайлівська гора", 6.2 – "Комплекс будинку Верховної Ради, Маріїнського палацу"; 7 – Державний історико-архітектурний заповідник "Стародавній Київ" (Міністерство культури та стратегічних комунікацій України, 2024, 2025); 8 – Пам'ятка ландшафту, історії (Історичний ландшафт київських гір і долини р. Дніпро); 9 – пам'ятки природи та садово-паркового мистецтва місцевого значення (Історико-архітектурний опорний план м. Києва, 2015)

Впродовж XX ст. дніпровські схили зазнавали значних впливів антропогенної діяльності: застосування заходів інженерного укріплення – будівництво підпірних стін, дренажів мілкого і глибокого закладання для відведення ґрунтових та підземних вод, виведення окремих з них з експлуатації з часом, висадження дерев та чагарників уздовж схилу, будівництво житлових споруд, прокладання траси Святошинсько-Броварської лінії київського метрополітену, наприкінці XX – початку XXI ст. зведення висотних споруд на палях тощо. Все це мало як негативні наслідки, так і позитивні впливи.

На даному етапі розмаїття антропогенного втручання на схилі вимагає упорядкування, аналізу взаємодії різних типів інженерних об'єктів з геологічним середовищем та іншими інженерними об'єктами та спорудами, чітке визначення зсувонебезпечних меж на дніпровських схилах, розроблення систем моніторингу за станом території, вироблення рекомендацій щодо містобудівної діяльності в межах схилів.

Головною метою цієї роботи є виявлення чинників розвитку зсувних процесів і формування нових уявлень щодо умов забезпечення стійкості системи дніпровських схилів у межах центрального історичного ареалу м. Києва.

Для цього виконано такі завдання: збір та аналіз літературних опублікованих даних, інженерно-геологічних досліджень за сторічний період техногенної діяльності та наукового прогресу; ретроспективний аналіз ділянок дніпровського схилу; вивчення інженерно-геологічних умов та природних і антропогенних чинників розвитку небезпечних зсувних процесів; аналіз ефективності наявних заходів з протизсувного захисту на обраній ділянці; встановлення закономірностей їх розвитку; вироблення системи поглядів на забезпечення стійкості системи дніпровських схилів на сучасному етапі.

Територія досліджень є частиною Центрального історичного ареалу Києва. Вона простягається вздовж правого берега р. Дніпро з північного заходу на південний схід та визначається в межах схилу від Наводницької до Глибочицької балки між урізом води у Дніпрі та вул. Лаврська, Мазепи, Грушевського, Трьохсвятительської, Великої Житомирської (див. рис. 1). Загальна середня протяжність становить 6,5 км, ширина 0,5–2,0 км, площа виділеної території 4,86 км$^2$.

**Методи**

У дослідженнях використано опубліковані та архівні матеріали науково-дослідних та проєктних організацій, а саме Інститут геологічних наук НАН України, архіви Національного заповідника "Києво-Печерська лавра", Київський національний університет будівництва і архітектури, Інституту географії НАН України, ВАТ "КИЇВПРОЄКТ", КП "СУППР", ТОВ "ГЕОІНФОРМ", ТОВ "ОСНОВА-СОЛСИФ", ТОВ "Магістральбудпроект", ПМП "Фірма Онікс-СВ".

Ретроспективний аналіз ділянок дніпровського схилу виконано за допомогою фотофіксації сучасного стану схилу та порівнянням фотографій з архівних джерел.

Аналіз інженерно-геологічних умов та чинників розвитку зсувних зрушень на схилах проводився з використанням аналітичних, статистичних, картографічних методів. Для побудови картографічних моделей використано геоінформаційні системи (застосунки ArcGIS, Surfer). Інженерно-геологічні розрізи побудовано засобами автоматизованого проєктування AutoCAD.

**Результати**

Систематизація періодів наукових досліджень зсувної небезпеки дніпровських схилів та робіт з їх укріплення.

*Дослідження до XX ст.*

Перші обґрунтовані геологічні матеріали щодо зсувів на території Києва знаходимо в роботі (Феофилактов, 1882), характерно, що вже тоді автор правильно інтерпретує зміщення ґрунтів на схилах центральної ділянки як поверхневі спливи в пониженнях рельєфу схилів (яри, "зсувні цирки"). Він визначав механізм зміщень першого ярусу київського типу через порушення стійкості, зумовлене утворенням порожнин унаслідок механічної суфозії в товщі ґрунтів вище бурих і строкатих глин. Зсуви другого ярусу, на його думку, не пов'язані із зміщеннями першого ярусу і зумовлені специфічними властивостями горизонту строкатих глин.

Інформація про зсуви, що сталися до 1866 р., вкрай неповна і уривчаста. Літописні дані свідчать, що вже в ранній період свого існування Київ, будучи розташованим на високому березі Дніпра, зазнавав руйнівної дії ерозійно-гравітаційних процесів, що спричинило потребу вжити заходів для захисту від руйнувань. Відомо, що в середині XI ст. на Печерській височині, яка собою "являла гористі лісові хащі", печери Печерського та Микільського Пустинного монастирів не раз завалювалися внаслідок ґрунтових обвалів (ІГН НАН України, 2012).

У Київському літопису, зокрема, є свідчення про будівництво в 1190 р. при князі Київському Рюрику Ростиславовичу підпірної мурованої стіни для захисту від дії річки Михайлівського монастиря на Видубичах. У зв'язку з цим М. С. Грушевський пише: "…факт прославлений риторичним панегіриком, що кінчить Київський літопис. Але сей мур не оборонив монастиря – від його церкви лишився тільки західний бік, східний, видко, потягнула земля в ріку" (Грушевський, 1992). З цього факту можна судити, що течія Дніпра тоді безпосередньо омивала пагорб, на якому була побудована церква і він зазнавав бокової ерозії, внаслідок якої і виникали зсувні зміщення ґрунтів.

Подальші документовані свідчення про проблеми з руйнуванням схилів та споруд на схилах відслідковуються із середини XVI ст. Л. С. Лічков, зокрема, наводить дані з "Литовской Метрики" 1545 р., де написано: "Киев за держанье Фридриха Пронского: А почала гора Замковая расоватся в трех местах, а звлаща на 1 местьци от поля яма не мала вирита плиненьем песку с водою дождевою, а так потребует там гора тамованья без мешканья". Збереглись також свідчення про те, що 5-го квітня 1685 р. "службовий іноземець Гордон" рекомендував відвести воду, що текла під пагорком, на якому стояла Печерська церква, й вирівняти ями та вибоїни. До цього ж часу, за архівними матеріалами Києво-Печерської Лаври, маємо віднести здійснення перших заходів щодо укріплення печер, підвалин церков, будинку типографії та інших споруд, котрим загрожували зсуви. Сенатський наказ від 29. XII 1753 р. свідчить, що зсуви зачіпали державні інтереси і викликали необхідність проведення протизсувних заходів (Лічков, 1938). Руйнування схилів ще у XVI–XVII ст. було переважно пов'язане з розвитком яружної ерозії.

Архівні матеріали Національного заповідника "Києво-Печерська Лавра" (Кагамлик, 2008) свідчать, що на його території зсуви виникали в різні пори року і за різних причин. Так, у 1758 р. після пострілу з гармати на честь імператриці Єлизавети відбулися зміщення основи Дальніх Печер і з'явилися тріщини підвалин. П. А. Тутковський навів дані про величезний зсув, який навесні 1864 р. після зливного дощу зрушив у Дніпро шосе поблизу водокачки (Тутковский, 1895), а також виділив глетчероподібний тип зсувів і описав їх морфологічні елементи.

У березні 1758 р. через зміщення біля Дальніх Печер завалилася дерев'яна підпірна стінка протяжністю понад 40 м, а решта нахилилася. У 1791 р. за пропозицією адміністрації Лаври інженер Малашевич склав проєкт укріплення схилів, який вперше передбачав, крім підпірних мурів, відведення поверхневих вод. Але ці заходи не зміцнили схил, і в 1798 р. постало питання про необхідність влаштування дренажних споруд і каптажу джерел підземних вод. Розроблений пізніше проєкт інженера Сухтелена передбачав спорудження двох ярусів цегляних штолень, з'єднаних поперечними галереями і двох підпорних стін з низової сторони штолень, паралельних їм. Вони збереглися до нашого часу і мають інвентарний номер 18 (Demchyshyn, & Kril, 2019).

Не припинялися зсуви і протягом XIX ст. Аномальні погодні умови, зливи 1829, 1839, 1844, 1846, 1848, 1849 та 1853 рр. стали причиною значних зсувів цього періоду, що змусило звернути увагу на укріплення схилів.

Проблеми забезпечення стійкості схилів та укосів, організації поверхневого та підземного стоків найшли досить вдале рішення при дорожньому будівництві в XIX ст., зокрема при влаштуванні узвозів: Володимирського (40-ві роки) та Миколаївського (Дніпровського) (60-ті роки) (Оппоков, 1934; Лічков, 1938).

Впродовж 1849–1860 рр. було укріплено укоси і прокладено Дніпровський (кол. Микільський) узвіз від Військового собору (тепер це східний бік площі Слави, урочище Аскольдова могила) на Печерську до Ланцюгового мосту (зруйнований, місце біля мосту Метро). На укосах спуску до мосту для його укріплення було застосовано дренажі та цегляні штольні (система № 17), через які дренажні води стікали у збірні криниці і далі у Дніпро. Планування схилів, що дренуються, проведено у 1862 р.

Негативну роль у розвитку берегового схилу р. Дніпро відіграло перекриття його східного рукава – р. Чорторий у середині XIX ст. (Demchyshyn, & Kril, 2019; Личков, 1928). Унаслідок цього підсилилась бічна ерозія правобережного схилу на його Центральній ділянці.

*Період 1900–1930 рр.*

На основі геолого-геоморфологічного аналізу (Личков, 1928) виконано узагальнення матеріалів про генезис правобережних терас р. Дніпро в межах підніжжя недислокованого плато, наведено дані про зсуви.

Період інтенсивного розвитку зсувів не тільки у весняний час, але й влітку та восени припадає на 1905–1907 рр. Так, у 1905 р. деякі ділянки Набережного шосе завалило суцільними масами на висоту до 1,5 м; зсув на Аскольдовій могилі завалив Набережне шосе настільки, що лише на 15-й день його розчистили.

Після відносно спокійних восьми років зсуви знов активізувалися у 1915–1916 рр. У 1915 р. після рясних весняних дощів з'явилися зсуви на Аскольдовій могилі; один із зсувів на Набережному шосе (біля водокачки) був завширшки 4 м.

Після інформаційної перерви наступні дані свідчать про прояви зсувів починаючи з 1924 р., коли в районі Києво-Печерської лаври, на Набережно-Печерській вулиці, зсув зруйнував будинок, у якому загинуло двоє людей. Спуск до ланцюгового мосту через завали не функціонував, і для зупинення зсувів, що розвивалися, вирішено було розпочати ремонт шосе та дренажних споруд.

Сприятливі для розвитку зсувів метеорологічні умови восени 1932 р., взимку і навесні 1933 р. призвели до того, що зсуви на схилах правого берега Дніпра на ділянці від Поштової площі до Аскольдової могили спричинили завал шосе та водовідвідних споруд у багатьох місцях.

У 1933 р. при Гідрометеослужбі створюється зсувна станція і видається збірник "Изучение оползневых явлений и борьба с ними". А. М. Дранніков на основі даних великомасштабної зйомки 1934–1935 рр. вперше узагальнює фізико-механічні властивості ґрунтів території м. Києва. Згодом опубліковано роботу (Лічков, 1938) з найбільш повним зведенням про зсуви на території Києва від літописних часів до середини 30-х рр. XX ст. Наведені дані про зсуви та боротьбу з ними на цій території у подальшому було використано у Генеральній схемі протизсувних заходів, опрацьованій під керівництвом А. М. Дранніков в 1945 р.

У 1934 р. зсуви в районі Набережного шосе не припинялися. У районі Києво-Печерської Лаври жінка, що випадково проходила, потонула у грязьовому потоці з верхньої частини Лаврського яру (зсувного цирку № 32).

Навесні 1936 р. зрушені ґрунти завалили Набережне шосе біля залізничної водокачки на 70 м. У 1939 р. відбувся сплив на схилі під Хрещатим парком (кол. Сад піонерів), який завалив ґрунтами двір і будівлю водопроводу.

На рис. 2 зафіксовано стан схилів у 30-ті роки минулого століття та їх теперішній стан. Ділянка від пам'ятника Магдебурзькому праву до ланцюжкового мосту проходить через 4–5 зсувних цирків. Відсутність деревної рослинності, площинний змив формують умови до розвитку яружної ерозії. На фото (рис. 2б) можна прослідкувати теперішній вигляд цирків та мисів. Схил впорядковано рослинністю, пішохідними доріжками (Фестивальна алея, Паркова дорога), підпірними стінками, дренажними системами, облаштовано набережну з берегоукріплювальними спорудами, що сприяє стабілізації та рівноважному стану схилу.




**Рис. 2. Зсуви на дніпровських схилах у 30-ті роки XIX ст.:**
а – (Киричко, 1957) та сучасний стан; б – фото Кріль Т. В., березень 2025 р.,
зліва направо – Парковий міст (1) до пам'ятника Магдебурзькому праву

*Укріплення схилів 40–70 рр. минулого століття*

Систематичні вивчення стану схилів і зсувних процесів розпочались у 1944 р., існують значні матеріали робіт та режимних спостережень Київської інженерно-геологічної та гідрогеологічної партії (Кондратенко, & Марчук, 1965). На основі цих досліджень було опрацьовано Генеральні схеми протизсувних заходів на території міста в 1945, 1972, 1984, 2001 рр.

У 1941 і 1943 рр. спостерігалися незначні зміщення зсувних мас у районі Набережного шосе між залізничною водокачкою і Аскольдовою могилою з виносом ґрунтів на набережну. У 1944 р. через незадовільну експлуатацію протизсувних споруд і пошкодження схилів під час воєнних дій відбулися зсуви на схилах між Поштовою площею і Лаврою.

Впродовж тривалого часу на ділянках прояву зсувних деформацій на схилах ведуться геодезичні та спеціальні інструментальні спостереження із застосуванням високоточних приладів, зокрема інклінометрів (О. Г. Григоренко, Я. В. Шевчук), виконуються проєктно-розвідувальні роботи для окремих ділянок розвитку зсувів, наявні акти комісій зі встановлення причин руйнівних та аварійних проявів зсувів, провалів над підземними виробками.

ISSN 1728-3817

Починаючи з 1945 р., інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови, палеогенові, неогенові, четвертинні відклади, рельєф дніпровських схилів як і території міста загалом вивчаються в процесі інженерно-геологічного обґрунтування промислового і цивільного будівництва, проведення заходів з інженерного захисту від зсувів (Дранников, 1946, 1948, Київпроєкт, Інжпроєкт, УкрДІІНТР та ін.), при інженерно-геологічних розвідуваннях Київського метрополітену (Метропроєкт), Київського та Канівського водосховищ та гідровузлів на Дніпрі (Гідропроєкт), під час середньо- і великомасштабної геологічної зйомки і завдячуючи спеціальним тематичним дослідженням.

У звіті (Подгайная, 1958) висвітлюються нові дані про геологічну будову та гідрогеологічні умови центральної зсувної ділянки, складено карти М 1 : 2000 сучасного стану зсувів за період робіт 1945–1956 рр.

Значні роботи із благоустрою та озеленення схилів Дніпра, прилеглих до центральної історичної частини міста, виконано в середині минулого століття. Розпочато роботи в 1936 р. Основні роботи виконано восени 1951 р., навесні 1952 р. методом народного будівництва. Посаджено понад 800 тис. дерев і кущів: дуби, клени (гостролистий, срібнолистий, ясенолистий), каштан звичайний, липа дрібнолиста, явір, ліщина, спірея, аморфа, калина, жасмин, бузина, а також тополя, акація, бересклет (Інститут геологічних наук НАН України, 2006).

Озеленення проводилось методом лісоукріплювальних густих насаджень деревно-кущової рослинності в кількості не менш як 8–10 тис. штук на 1 га. Всього на схилах Дніпра від Поштової площі до Видубичів, за даними Київзеленбуду, було висаджено 510 тис. дерев та 900 тис. кущів. Проведення цих заходів позитивно вплинуло на стан схилів долини р. Дніпро і його приток, сприяло зниженню активності ерозійно-гравітаційних процесів.

У 1960 р. проводяться додаткові дослідження з вивчення стану зсувного схилу в районі будівництва ст. м. "Дніпро", у 1966 р. – на ділянці Володимирська гірка – Андріївський узвіз у зв'язку з початком проєктування Куренівсько-Червоноармійської (тепер Оболонсько-Теремківська) лінії метрополітену. Гравітаційні процеси на схилах в м. Києві досліджувались у рамках комплексної роботи Виробничого та науково-дослідного інституту з інженерних досліджень у будівництві Держбуду СРСР на чолі з Ф. В. Котловим (Котлов, Сипягина, Баршина, 1964).

*Дослідження 80–90 рр.*

В 1980 р. Київська комплексна гідрогеологічна та інженерно-геологічна партія Мінгео УРСР провела роботи із систематизації зсувів. У районі м. Києва і його приміської зони описано понад 450 зсувів, складено їхній кадастр з детальною характеристикою морфології та динаміки.

Багаторічні дослідження різних організацій дають змогу зробити висновки, що зсуви на правобережному схилі Дніпра в межах Києва, Стайок, Гребенів мають виключно техногенний характер (виведення рослинного покриву, закладення кар'єрів, підрізки схилів, порушення стоку, перевантаження та інші).

Загалом слід виходити з положення, що проблема зсувів є проблемою схилів, особливо, коли в результаті господарської діяльності на них порушені природні умови, що склалися (Демчишин, 1992).

В проєктних і проєктно-розвідувальних організаціях Києва накопичено значні обсяги інженерно-геологічної інформації стосовно проявів небезпечних геологічних процесів, яка потребує узагальнення та систематизації, оскільки досі неоднозначно трактуються несуча спроможність основних літолого-генетичних комплексів ґрунтів, що виступають основами споруд, недостатньо узагальнений досвід проведення заходів з інженерного захисту територій, зокрема протизсувних заходів. Найбільш повні узагальнення інженерно-геологічних умов виконувалися при обґрунтуванні Генеральних планів міста (1972,1984, 2001 рр.) та генеральних схем протизсувних заходів.

Багато ускладнень на схилах в м. Києві витворилось унаслідок провалів над підземними виробками і, зокрема, над штольневими дренажами. Аварійні ситуації в зв'язку із цим неодноразово виникали на території Києво-Печерської лаври та інших ділянках Дніпровських схилів.

*Сучасні дослідження з часів незалежності України*

З 1993 р. роботи з вивчення стану зсувних схилів проводила Комплексна гідрогеологічна партія ДРГП "Північгеологія" із залученням топографо-геодезичних і геофізичних служб.

Комплексна геофізична партія Київського державного геологічного підприємства "Геосервіс" у 1998–2002 рр. виконала електророзвідку методом мікроелектророзвідувань для оцінки зсувонебезпечності та стійкості підґрунтя важливих інженерних споруд та історико-культурних пам'яток на правобережному схилі р. Дніпро (Майко та ін., 2002). У роботі виділено 30 нестійких, зсувонебезпечних та 26 частково активізованих областей, для окремих ділянок побудовано схематичні карти критерію ймовірності зсувів.

В 2016 р. фахівці державної установи "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України" виконали наукову роботу з теми: "Визначення розвитку зсувних процесів у межах м. Києва в режимі моніторингу (з використанням матеріалів дистанційних зйомок)" (Київська міська державна адміністрація, 2016). Головною метою досліджень була розробка та впровадження ГІС для моніторингу розвитку і прогнозу активізації зсувних процесів у м. Києві на основі аналізу новітньої космічної інформації високого і надвисокого просторового розрізнення. Робота базувалась на основі аналізу супутникових даних високої та надвисокої просторової розрізненості з інтеграцією їх у програмні комплекси ГІС-аналізу та обробки. Головним методичним прийомом досліджень був геоморфологічний аналіз зсувних ділянок за ЦМР, визначення градації схилів за стрімкістю та відносними перевищеннями над базисом ерозії, поділ на елементарні басейни (Філіпович, Ліщенко, & Пазинич, 2019; Filipovych, Lischenko, & Marhes, 2023; Kril, & Shekhunova, 2019). Проведення структурного дешифрування знімків дало змогу виконати лінеаментний аналіз території, ідентифікувати прояви приповерхневих та глибинних розломів, їх флюїдоактивність та зв'язок з розвитком екзогенних процесів (Ліщенко, Пазинич, & Філіпович, 2017). Результатом проведених робіт став набір ГІС-шарів, на яких зафіксовано зсувонебезпечні ділянки та простежено їх динаміку розвитку.

Спеціальне управління протизсувних підземних робіт (СУППР) проводить постійні обстеження зсувонебезпечних ділянок, здійснює нагляд за станом протизсувних інженерних споруд. При обстеженнях було складено перелік активних зсувів Центральної історичної частини Києва станом на 2018 р. (Міністерство культури та стратегічних комунікацій України, 2024). Серед них 18 припадають на територію досліджень, 8 з них знаходяться у беспосередній близькості або збігаються з обрисами цирків старих зсувів.

З часів незалежності України дослідження на схилах проводять не тільки державні установи, а й приватні організації при виконанні вишукувальних робіт. Для будівництва нових об'єктів, таких як житловий комплекс "Daimond Hill" (вул. І. Мазепи,11-Б), конгресно-виставковий центр "Парковий" з автомобільною естакадою (Паркова дорога, 16-а), друга черга Національного музею Голодомору-геноциду (вул. Лаврська, 3), міжнародний діловий центр "Summit" (вул. Грушевського, 9-б), детальні інженерно-геологічні вишукування проводила приватна група компаній "Основа". Для проєктування "скляного" пішохідного мосту між Володимирською гіркою та Аркою свободи українського народу вишукування виконала команда ПМП "Фірма "ОНІКС-СВ". Завдяки буровим роботам можна досліджувати геологічне середовище схилів на глибину 40–70 м, що дає змогу уточнити сучасні інженерно-геологічні та гідрогеологічні умови. Незважаючи на те, що вони носять хаотичний, несистематизований, локальний характер, проте новітні інженерно-геологічні дані, такі як літолого-стратиграфічна будова, фізико-механічні характеристики ґрунтів, просторова мінливість властивостей ґрунтів, інформація про рівні та хімічний склад підземних водоносних горизонтів, отримані за сучасними технологіями буріння та зондування ґрунтового масиву (колонкове буріння з продувкою та промивкою, застосування оббурюючих ґрунтоносів, SPT, CPT, DPT), сучасні лабораторні дослідження із застосуванням приладів тривісного стиснення, вказують на необхідність оновлення карт інженерно-геологічного районування, уточнення границь геологічних шарів на різномасштабних картах, розрізах тощо. Враховуючи сучасну активу містобудівну діяльність у межах схилових територій, постає загальноміська проблема встановлення зсувонебезпечних меж на схилах із розробленням сучасних науково-методичних підходів до оцінки їх стійкості із використанням математико-аналітичного комплексного аналізу, реалізованого в сучасних програмних комплексах.

*Узагальнення основних уявлень про чинники формування зсувних зрушень на дніпровських схилах*

За особливостями геологічної будови, морфології долини р. Дніпро (наявності терас), станом забудови та розвитком ерозійно-гравітаційних процесів на схилах у межах Києва виділяють п'ять ділянок: Подільську, Давнього Києва, Центральну, Залаврську і Видубицьку (Інститут геологічних наук НАН України, 2006). У межах території дослідження ми розглядаємо ділянки Давнього Києва, Центральну та Залаврську (рис. 3).

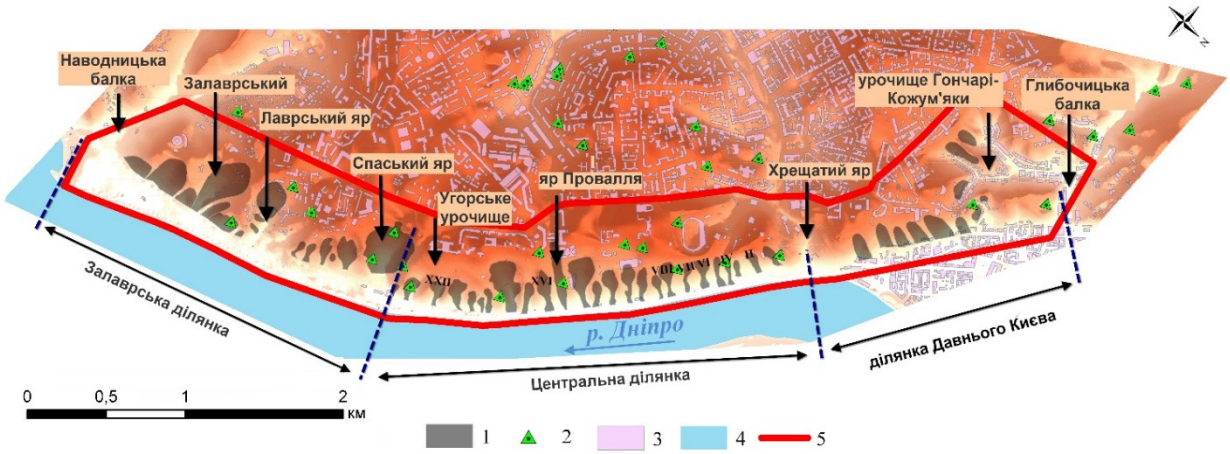



**Рис. 3. Ділянки дніпровських схилів:**
1 – зсувні цирки (нумерація згідно з класифікацією СУППР); 2 – зсувонебезпечні ділянки та активні зсуви, станом на 2018 р. (Київвласть, 2025); 3 – будівлі та споруди; 4 – акваторія; 5 – межі досліджень

Незважаючи на значні стабілізаційні заходи з укріплення схилів СУППР-ом періодично фіксується активізація зсувних зміщень. Відповідно до переліку зсувонебезпечних ділянок м. Київа (Міністерство культури та стратегічних комунікацій України, 2024) в межах території досліджень виділено 18 зсувонебезпечних ділянок та активних зсувів, серед яких 7 збігаються з абрисами зсувних цирків, сформованих за останні 100–200 років (рис. 3).

У таблиці 1 наведено площі території схилів за градацією кутів нахилу для виділених ділянок у межах дослідження. Території з кутами нахилу 15–25 ° займають 25–34 % відповідно до площі кожної ділянки. При таких нахилах залежно від складу, структури та консистенції ґрунтових шарів схилу формуються умови для зародження та активізації зсувів, опливин (Демчишин, 1992; Wu, Guo, & Shao, 2023). Найпоширеніші кути нахилу змінюються від 5° до 15°, що за площею становить 39–48 %, залежно від типу ділянки. Для територій з таким діапазоном кутів можлива активізація водно-ерозійних, гравітаційних процесів у піщано-глинистих ґрунтах внаслідок додаткового зволоження. Території з ухилом понад 35° мають незначне поширення, пов'язані із брівкою лесового плато.

Ділянка ***Давнього Києва*** охоплює територію протяжністю 1,8 км від Глибочицької балки до Хрещатого яру (Володимирський узвіз). Ділянка має унікальний рельєф, де розташовані мальовничі ландшафтні утворення – ерозійні останці: гори Замкова, Старокиївська, Уздихальниця, Дитинка, Хорева, Андріївська, Михайлівська, Володимирська.

У межах ділянки Давнього Києва абсолютні позначки поверхні дніпровського схилу змінюються від 104 м у підніжжя схилів до 185 м на брівці плато. Найкрутіші уступи мають висоту 22–37 м та крутість 38–47°. На території ділянки 11 зсувних цирків (рис. 3). З особливостей геологічної будови для території характерне чергування масивів з наявними та відсутніми зсувними терасами, які зазвичай приурочені до схилів північної та північно-східної експозиції. У деяких місцях спостерігається повна відсутність товщі озерно-алювіальних нижньо- та середньонеоплейстоценових глин (Ia $P_{I-II}$), які виступають водотривким шаром розділу між водоносними горизонтами у флювіогляціальних та озерно-алювіальних відкладах.

ISSN 1728-3817

*Таблиця 1*

**Градація кута нахилу денної поверхні (α) у різних ділянках дніпровського схилу**

| Назва (площа) | Площа території з відповідним кутом нахилу денної поверхні, % | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | α≤5 | 5<α≤15 | 15<α≤25 | 25<α≤35 | 35<α≤45 | α>45 |
| Старокиївський (887 476 м$^2$) | 18,0 | 39,6 | 25,7 | 13,2 | 3,1 | 0,4 |
| Центральний (953 580 м$^2$) | 10,6 | 40,2 | 33,9 | 13,2 | 1,9 | 0,2 |
| Залаврський (958 304 м$^2$) | 16,7 | 48,2 | 25,7 | 7,5 | 1,8 | 0,1 |

На схилах Гончарного і Дігтярного ярів (урочище Гончарі-Кожум'яки) відмічались зсуви в раніше зміщених лесових відкладах. Натепер низини урочища забудовані малоповерховими житловими та адміністративно-комерційними будівлями та спорудами.

Деформації та руйнування схилів на ділянці Давнього Києва зумовлені перезволоженням схилових відкладів атмосферними водами (зсув по вул. Андріївський спуск, західніше Андріївської гірки), водами з труб несправних мереж водогону. Підрізка схилів для облаштування парків та заглиблення будівель у схили при забудові урочища Гончарі–Кожум'яки спричинило формування ослаблених зон, які проявлені у локальних блочних мікрозсувних процесах з утворенням тріщин заколу на брівках схилів.

***Центральна ділянка*** включає територію завдовжки 2,5 км – від Хрещатого яру (Володимирський узвіз) до Спаського яру (північний бік парку Вічної Слави) в т. ч. Угорське урочище. Тут русло Дніпра підходить безпосередньо до підошви берегового схилу, де у 30–70-х роках XX ст. виконано його інженерний захист з облаштування підпірних стін та насипу, по якому було прокладено колії трамваю (до 2006 р.), Набережне шосе, облямоване гранітом (арх. В. Осьмак). Висота схилу 89–109 м при середній його крутості 15–25°.

На верхній межі схилу простягається крутий, часто стрімчастий прибровочний уступ заввишки 16–23 м, до підошви якого прилягає положиста верхня зсувна тераса (ширина до 120–180 м). Далі вона плавно переходить у нижню частину схилу з висотою 40–60 м і крутістю до 35–45°. На поверхні цього уступу зосереджені 25 ярів-балок з циркоподібними розширеннями у своїх верхніх частинах – ерозійно-зсувні цирки. Ці цирки розділені між собою гребнями т. зв. зсувороздільними мисами. Верхня частина цирків врізана в поверхню тераси, причому окремі цирки прослідковуються майже до підошви схилу. Ширина насипу 40–50 м при висоті її поверхні 11 м над меженним рівнем Дніпра. З боку річки насип захищений від підмиву берегоукріплювальною стіною.

Геологічна будова схилу представлена повним розрізом відкладів, характерним для лесового плато (рис. 4). Специфічний профіль схилу на Центральній ділянці являє собою результат тривалої дії ерозійно-гравітаційних процесів, що особливо активно проходили тут у зв'язку з вирубкою лісу, що існував до початку розбудови міста.

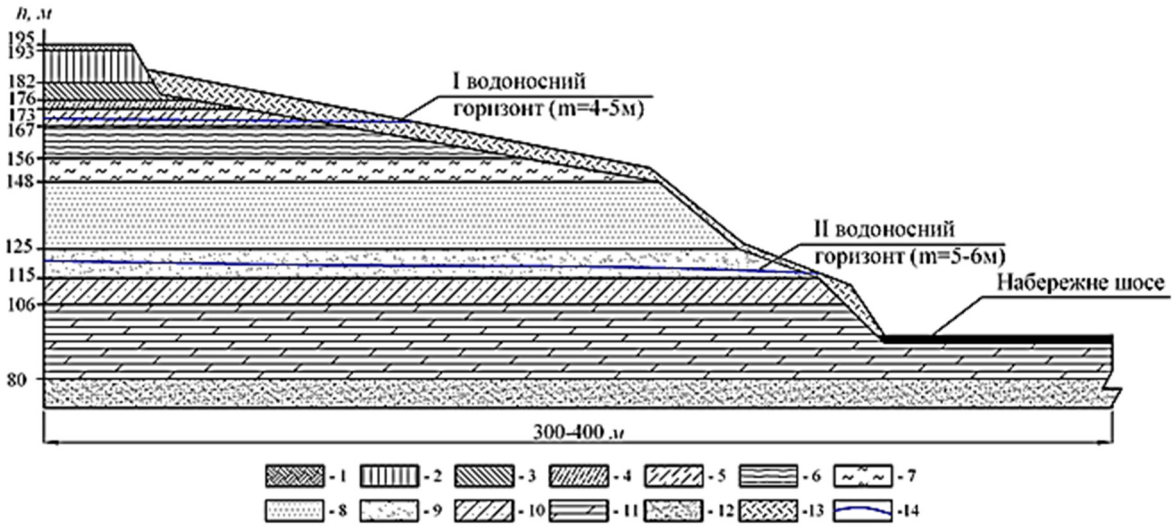



**Рис. 4. Схематичний інженерно-геологічний розріз Центральної ділянки схилу правого берега Дніпра:**
1 – техногенні відклади (t H); 2 – леси та лесоподібні суглинки (e,dv $P_{III}$-H); 3 – моренні відклади (піски і суглинки) (g $P_{II}$dn); 4 – флювіогляціальні піски (f,l $P_{II}$dn); 5 – суглинки прісноводні (la $P_{I-II}$); 6 – бурі глини ($N_2$čb); 7 – строкаті глини ($N_{1-2}$sg); 8 – піски полтавської світи ($N_1$np); 9 – піски харківської серії (P$_3$mz); 10 – наглинок (P$_2$kv); 11 – спондилові глини (P$_2$kv); 12 – піски бучацької світи (P$_2$bc); 13 – делювільно-зсувні породи (dz $P_{III}$-H); 14 – перший та другий водоносні горизонти

Нині зсувні процеси мають поодинокий характер і відбуваються в межах верхнього уступу, зокрема там, де він має найбільшу висоту і не укріплений або при аварійних витоках мереж водогону. У таких місцях спостерігаються деформації краю лесового плато з утворенням тріщин "заколу" й осіданням ґрунту. Наприклад, на краю плато проти VIII цирку на майданчику біля музичної раковини приблизно з 1950 р. спостерігається дугоподібна тріщина-закол завширшки до 0,3 м, що охоплює ділянку вздовж брівки 150 м і завширшки до 13 м.

Ерозійні та мікрозсувні процеси також спостерігаються вздовж Фестивальної алеї. Вона прокладена по нижньому краю зсувної тераси та брівки нижньої частини схилу. На рис. 5 видно деформації дорожнього покриття, підпірної стінки, вимив ґрунту з-під них, зрушення ґрунтових мас вниз по схилу.



а б

**Рис. 5. Сучасний стан Фестивальної алеї:**
а – деформації дорожнього покриття та вигинання утримуючих конструкцій брівки алеї,
б – руйнування утримуючих конструкцій та змішення по схилу (фото А. О. Стрельцова, травень 2025 р.)

На Центральній ділянці спостерігалися також суфозійні руйнування схилів, спричинені дренуванням на схилі вод II водоносного горизонту. Процес суфозії значно активізувався в 40–50-ті рр. минулого століття вздовж трас багатьох підземних дренажних штольневих систем (ДШС), особливо на ділянках завалених дренажних колодязів. Це виявилося причиною виникнення провальних лійок по трасах штольневих систем й активізації зсувних переміщень схилових відкладів у межах т. зв. зсувних цирків: VI (провальні лійки в середній частині схилу на місці дренажних колодязів); VII (зсуви по поверхні неогенових строкатих глин і великі провальні лійки завглибшки 8 м, діаметром 10 м у місця завалених дренажних колодязів); IX (зпливи та опливини, лійки уздовж трас 12-й і 20-й ДШС); XVI (зсуви суфозійні руйнування схилів ), а також II (зпливи та опливини в елювіально-делювіальних утвореннях, провальні воронки) і VIII (деформації просідання поверхні в Міському саду – протяжна тріщина біля музичної раковини, активізовані суфозією при чищенні і заміні 12 ДШС). Внаслідок цього формується ослаблена зона навколо дренажної виробки, яка і є причиною тривалих деформацій схилу.

Антропогенні впливи призвели до виникнення низки інших зсувних деформацій у межах Центральної ділянки. Привантаження схилів спричинило зсувні деформації будинку Національної філармонії України (північно-західний край Центральної ділянки), біля стадіону "Динамо" (VI цирк). Надходження в ґрунт води з несправних водонесучих комунікацій та внаслідок неупорядкованого поверхневого стоку атмосферних опадів є причиною повторних переміщень схилових відкладів та яружного делювію.

У січні 2024 р., після рясних дощів, в верхів'ї зсувного цирку XXIII неподалік Аскольдової могили відбувся зсув ґрунту за механізмом – зсув опливання (рис. 6). Причиною активізації зсувного процесу стало перезволоження ґрунтів атмосферними водами, що призвело до зниження їх міцнісних характеристик та збільшення об'ємної ваги. Разом з особливістю геоморфологічної та геологічної будови ділянки, а саме близького до поверхні залягання водотривких відкладів строкатих та бурих глин, нахил їх покрівлі та поширення вниз до підніжжя схилу, склалися умови для виходу ґрунтового масиву з стану рівноваги. Перезволожені ґрунтові маси майже досягли підніжжя схилу біля проїжджої частини Набережного шосе.



а б

**Рис. 6. Зсув-опливина неподалік Аскольдової могили, верхів'ї зсувного цирку № XXIII:**
а – вид на схил з брівки схилу; б – вид з підніжжя схилу (фото А. Стрельцова, червень 2024 р.)

***Залаврська ділянка*** завдовжки 2 км виділяється на схилі Дніпра від Спаського яру (північний бік парку Вічної Слави) до Наводницької балки. До підніжжя берегового схилу тут прилягає відносно нешироко (переважно 50–100 м) смуга дніпровської заплавної тераси, на поверхні якої залягають сучасні техногенні відклади потужністю в середньому 5 м. Висота схилу над заплавою близько 80 м за середньої крутості 23–26°. Для Залаврської ділянки

ISSN 1728-3817

порівняно із Центральною характерна велика розчленованість схилу ерозійними врізами, тут розташовані три великих яри: Спаський, Лаврський і Залаврський (Запечерний). На території ділянки виділяється 16 зсувних цирків.

У розрізі схилів ділянки здебільшого відсутні флювіогляціальні піски (f,l $P_{II}$dn) і моренні суглинки (g $P_{II}$dn). Виняток становлять більш високі ділянки, де присутній весь розріз, характерний для плато, крім першого горизонту прісноводного суглинку і верхнього шару бурої глини.

Відзначені особливості геологічної будови схилів визначили місцеві особливості формування зсувів. На ділянках, де лесові ґрунти залягають безпосередньо на неогенових строкатих глинах, відбуваються обвали лесових ґрунтів під впливом атмосферних опадів з наступним їх зміщенням по схилу у вигляді опливин чи зсувів-потоків.

Для ділянок схилів, що розкривають практично повний розріз четвертинних відкладів, зміщеннями охоплюються лесоподібні відклади (e,dv $P_{III}$-H), моренні суглинки (g $P_{II}$dn) і бурі глини ($N_2$čb). Подібні зсуви спостерігалися в 1961 р. на схилах Запечерного яру, причому зсуву сприяли рясні затяжні дощі, що насичували схилові відклади з жовтня 1960 р. по січень 1961 р. (Інститут геологічних наук НАН України, 2006).

На ділянках, де схили розкривають відклади київської світи і мають вихід на поверхню води II водоносного горизонту з пісків харківської серії, формуються зміщення порід над наглинком ($P_2$kv). Переміщенням тут також сприяють рясні тривалі дощі.

В умовах незарегульованого поверхневого стоку і постійних виходів підземних вод на поверхню схилу формуються зсуви-опливини і спливи. Активізації зсувів сприяли локальні витоки поверхневих вод зі зруйнованих лотків, а також підпір підземних вод унаслідок кольматації ґрунтів у зоні впливу дренажних систем.

*Чинники розвитку зсувних процесів на дніпровських схилах*

Формування умов зсувної небезпеки і активізації зсувних процесів та явищ на дніпровських схилах Києва зумовлені комплексом чинників, дія яких варіюється від регіонального до об'єктового рівнів: сейсмічність і неотектонічні рухи, геологічна будова та гідрогеологічні умови, літологічні особливості та фізико-механічні властивості порід, активізація ерозійних процесів, антропогенних впливів, метеорологічних умов та аномальних синоптичних ситуацій тощо. Зазвичай активізація зсувів є результатом одночасного впливу кількох чинників. При цьому зміни відбуваються у значеннях параметрів, що визначають величини зрушуючих та утримуючих сил. Відповідно до умови граничного напруженого стану Кулона–Мора основними параметрами є зчеплення (c, кПа), кут внутрішнього тертя (φ, град.), а також важливими – об'ємна вага ґрунту (γ, кН/м$^3$), геометрія схилу (висота *h*, довжина *l,* кут нахилу α), рівень ґрунтових вод, умови дренування, які визначаються типом ґрунту (рис. 7).

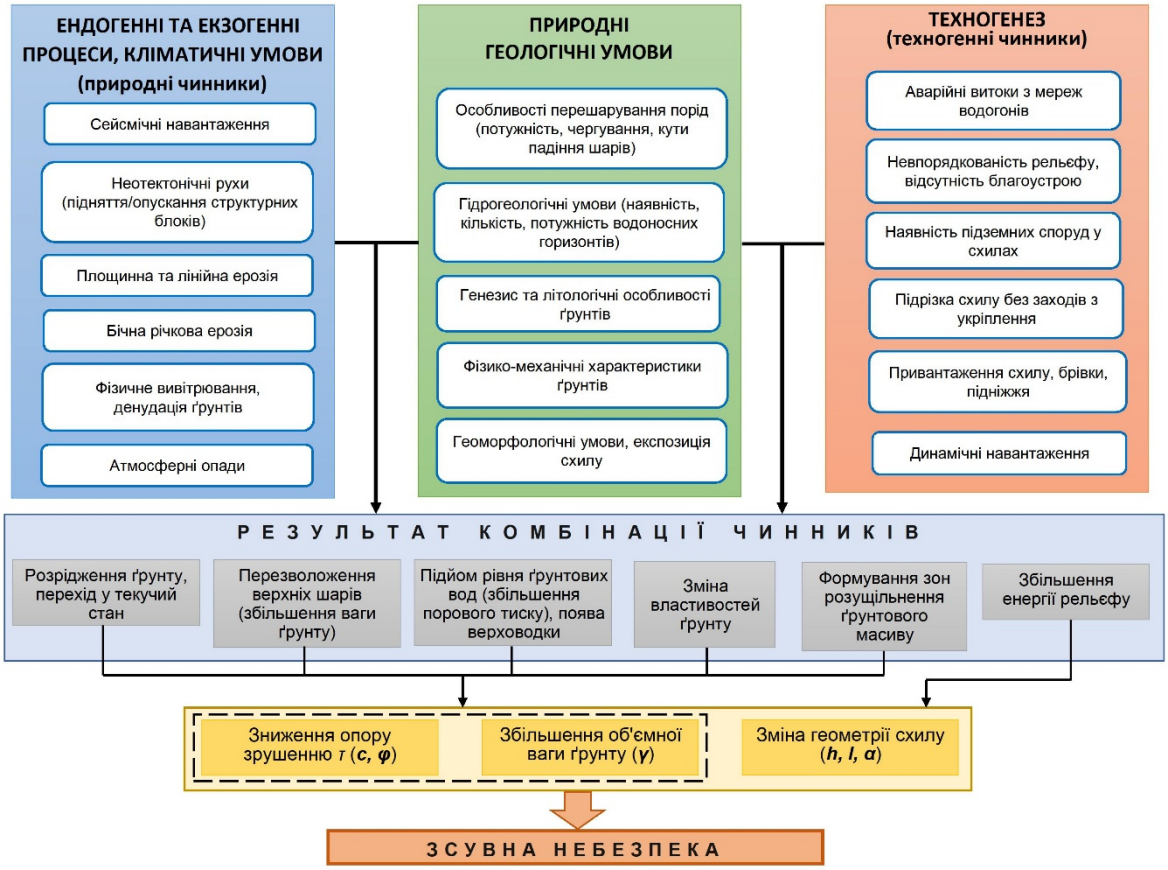



**Рис. 7. Систематизація наслідків взаємодії різних чинників на формування зсувної небезпеки**

*Геологічна будова*, що є результатом історичного розвитку території під впливом тектонічних рухів, підняття та опускання блоків кристалічного фундаменту, чергування трансгресійно-регресійних циклів, процесів осадконакопичення, діагенезу, метаморфізму та катагенезу осадових порід, пенепленізації поверхні ландшафту, зумовлює параметри, що визначають первинні умови стійкості схилів: структуру кристалічного

фундаменту, характер залягання осадових корінних та четвертинних порід, літолого-стратиграфічні особливості геологічного розрізу, фізичні та механічні властивості окремих інженерно-геологічних елементів тощо.

*Неотектонічні рухи* в новітній і сучасний час додатного та від'ємного напрямків формують рельєф значних територій, спричиняють у межах піднятих структурних блоків сильну ерозійну розчленованість рельєфу й утворення високих і крутих схилів. Центральна історична частина міста переважно розташована в межах Печерського горсту − найактивніша тектонічна структура досліджуваного району. Він на сучасному етапі зазнає підняття зі швидкістю 2 мм/рік. Горст обмежується низкою розломів, простягання яких збігається з напрямками основних елементів сучасної гідрографічної мережі. Для нього характерний найбільший розвиток зсувів на Дніпровських схилах, зокрема Центральної ділянки, де фіксуються найвищі позначки абсолютних висот лесового плато і найбільш високе положення стратиграфічних горизонтів корінного масиву.

*Сейсмічні впливи* залежно від віддаленості епіцентрів та величини магнітуди можуть призводити до зміни у структурі та текстурі гірської породи, її мінеральному складі та фізико-механічних властивостей. Це сприяє виведенню зі стану рівноваги зсувонебезпечних схилових ділянок та виникнення раптових зсувних процесів. Особливо небезпечні ділянки, де вірогідна площина сковзання проходить по слабких, водонасичених ґрунтах III-ї категорії сейсмічності (200<Vs<500 м/с) (Мінрегіонбуд України, 2014). Сейсмічну активність території м. Києва визначає осередок у районі гір Вранча (Румунія); осередки на вигині Карпатської дуги; сейсмічні події на платформних структурах України. У роботі (Кутас, & Омельченко, 2008) наводиться аналіз прояву одного із сильних землетрусів, що стався 30 травня 1990 р. За середнього рівня бальності струшувань території міста 4 бали у деяких його районах їх інтенсивність була вища – у старій частині міста, включаючи ділянки поблизу р. Дніпро та на ділянках із горбистим рельєфом тощо.

*Сучасні екзогенні процеси* є основними рельєфоформуючими чинниками досліджуваної території, серед них виділено такі:

• бічна ерозія Дніпра, що визначила просторову приуроченість сучасних зсувів на правобережному схилі річки. Переважна кількість з них сформувалася на Центральній ділянці, де відсутні правобережні заплавна і надзаплавна тераси і де берег протягом голоцену розмивався річкою (Демчишин, & Лапинский, 1979; Демчишин, 1992). На сьогодні цей чинник не впливає на зсувотвірні процеси, оскільки дніпровські схили захищені від розмиву штучним насипом Набережного шосе із залізобетонною підпірною стіною;

• площинна та лінійна ерозія до 50-х рр. XX ст. була одним з основних чинників розчленування рельєфу, поглиблення ярів, розширення долин балок. У зв'язку із зарегулювання поверхневого стоку, засадженням схилів деревною та чагарниковою рослинністю розвиток цих процесів за останні 100 років втратив свої визначальні позиції у формуванні зсувної небезпеки схилів. Тільки в межах незаліснених схилів ділянки Давнього Києва зазначені процеси ще зберегли свою небезпечність, поглиблюючи ерозійні врізи на схилах, зокрема в лесоподібних ґрунтах;

• денудація корінних та делювіально-зсувних ґрунтів, а також фізичне вивітрювання глинистих ґрунтів (зазвичай неогенових червоно-бурих і строкатих глин) відбувається переважно в межах зсуворозділних мисів, на ділянках, де рослинність відсутня. Це призводить до деградації поверхневого шару ґрунтів, їх фрагментації та осипання до низу схилу. Цей процес має локальні прояви. Автори відзначили такі місця між зсувними цирками № XXIV–XXV, а також в межах будівельного майданчика Національного музею "Меморіал жертв Голодомору" у Спаському яру, де були відслонені відклади червоно-бурих глин.

*Гідрогеологічні умови* значною мірою впливають на формування зсувів. Наявність і рух підземних вод не тільки впливає на міцнісні та деформаційні властивості ґрунтів, а спричиняє гідростатичні та гідродинамічні тиски (Шутенко та ін., 2004). На території досліджень поширені три ґрунтових водоносних горизонти: у четвертинних еолово-делювіальних і озерно-льодовикових відкладах на плато, у четвертинних делювіальних ґрунтах на схилах і, повсюдно, в олігоценових (харківських) пісках (Колот та ін., 1984). З верховодкою (тимчасовим водоносним горизонтом) зв'язані осідання лесоподібних та техногенних відкладів, їх обвалів і подальших зсувів у вигляді зсувів-потоків і спливів.

Із врахуванням виходів на схил цих водоносних горизонтів зсувні зміщення ґрунтів по схилу є вірогідними на трьох рівнях:

• зсуви у четвертинних відкладах (надморенних лесах та в підлесових глинах і суглинках) з проходженням поверхні ковзання значною частиною в бурих або строкатих глинах;

• зсуви в делювіальних схилових відкладах;

• зміщення на контакті київських і харківських відкладів палеогену.

Вплив *генезису та літологічних особливостей ґрунтів* на ерозійно-гравітаційні процеси руйнування схилів значною мірою видно з наведеного в табл. 2 розподілу зсувів за приуроченістю їх до основних стратиграфічних горизонтів (у відношенні до загальної кількості зсувів, що спостерігалися за 150 років у межах Києва). Найбільша кількість зсувних процесів спостерігається в межах лесоподібних утворень і глинистих порід (моренні та нижньочетвертинні суглинки й глини, а також неогенові та палеогенові глини), що становить 37 та 49 % відповідно від загальної кількості випадків.

Участь лесоподібних відкладів у схилових процесах пояснюється здатністю легкого руйнування їх структури за взаємодії з водою і високим ступенем розмивання поверхневими водами. Це призводить до нагромадження пухкого матеріалу і при його зволоженні поверхневими і підземними водами створює умови для розвитку опливин, спливів і зсувів-потоків.

Специфічні властивості глинистих відкладів товщ неогенових червоно-бурих і строкатих глин, а також палеогенових спондилових глин київської світи зумовили широкий розвиток зсувних процесів, які відбуваються по них. Глини – ідеальне середовище для зсувів через свою структуру, низьку водопроникність і схильність до втрати міцності при зволоженні. Схильність до набухання призводить до зниження міцності порід (кута внутрішнього тертя та питомого зчеплення); низька водопроникність підвищує поровий тиск (u, кПа), тим самим знижується ефективний тиск (σ`, кПа); наявність консолідаційної тріщинуватості (системи тріщин) формує зони зменшення сил структурного зв'язку, збільшення фільтрації води.

Переважний вміст часток розміром 0,1–0,25 мм (Карпенко, Маринич, & Стрельцов, 2019) у гранулометричному складі пісків полтавської і харківської серій визначає їх суфозійну нестійкість, сприяючи гідродинамічному виносу часток ґрунту і наступному обваленню порід, що залягають над ними, утворенню суфозійних руйнувань схилів. Розвиток суфозійних процесів пов'язаний з освоєнням підземного простору (наявністю підземних дренажних систем, тунелів, сховищ тощо) та розвитком мульд осідання над ними.

*Таблиця 2*

**Розподіл зсувів на території м. Києва за приуроченістю до основних стратиграфічних горизонтів**

| Генетичний та віковий індекс | Літологічні різновиди | Потужність комплексу, м | Водоносний горизонт | % від загальної кількості проявів |
|---|---|---|---|---|
| e,vd $P_{III}$-H | Лес і лесоподібні суглинки, супіски | 0,1–15 | Невитриманий (типу верховодка) | 37 |
| f,l $P_{II}$dn | Флювіогляціальні відклади (піски) | ≤15 | Невитриманий (типу верховодки) | 1 |
| g $P_{II}$dn | Морена (суглинки, глини) | 0,1–12 | Відсутній | 7 |
| f,l $P_{II}$dn | Підморенні піски | 2,5–4 | Витриманий | 2 |
| la $P_{I-II}$ | Прісноводні суглинки | 1,7–3 | —\|\|— | 5 |
| $N_2$čb | Бурі глини | 0,5–12 | Спорадичний або відсутній | 22 |
| $N_{1-2}$sg | Строкаті глини | 0,1–10 | Відсутній | 13 |
| $N_1$*np* | Новопетрівські піски | 24–28 | Рідкі обводнені лінзи на прошарках глини | 4 |
| ~~$P_3$~~ *br,* ~~$P_3$~~ *mz* | Берекські і межигірські піски | 2,5–3,5 12–15 | Витриманий повноводний | 7 |
| ~~$P_2$~~ *k*v | Наглинок | 6–7 | Відсутній | 1 |
| ~~$P_2$~~ *k*v | Мергельні глини | ≤20 | —\|\|— | 1 |

*Фізико-механічні властивості ґрунтів* визначають міцнісні характеристики та стійкість масиву ґрунту, що утворює схил. Зміни таких показників, як кут внутрішнього тертя (φ, град.), питоме зчеплення (с, кПа), щільність (γ, кН/м$^3$) ґрунту при додаткових факторах перезволоження, статичних і динамічних навантаженнях призводять до зниження їх структурної міцності, характеру розвитку зсувних поверхонь (Черный, 1979; Abdelmonem, Abo Bakr, & Saad Eldin, 2023; Kril, & Streltsov, 2025; Wang et al., 2024).

*Зонально-кліматичні умови,* зокрема кількість опадів, температура, прояв аномальних метеорологічних умов, впливають в основному на розвиток зсувів-потоків, спливів, опливин. За даними стаціонарних спостережень за період з 1945 по 1980 р., зсувні переміщення за сезонами року розподілені таким чином: весна – близько 80 % від загальної кількості зсувів, літо – 5 %, осінь – 11 %, зима – близько 4 % (при сумарному обсязі породи, що змістилася, 1,2; 0,13; 0,06 і 0,008 млн т$^3$ відповідно) (Інститут геологічних наук НАН України, 2006). Такий розподіл зсувів зв'язаний переважно з інфільтрацією атмосферних опадів, тільки 10 % від загальної кількості яких надходить на підживлення водоносних горизонтів. Сніготанення і рясне випадання дощів призводять до активізації старих і утворенню нових зсувів, особливо в місцях, де поверхневий стік не упорядкований. Л. С. Лічков, А. М. Дранников і В. І. Хазін, Є. П. Ємельянова у своїх роботах вказували на виразний зв'язок кількості зсувів у весняний період з кількістю опадів у попередні 1,5–2 років.

Зсуви ґрунту можуть статися безпосередньо під час сильних дощів або через кілька годин чи навіть днів після них через зниження міцнісних характеристик при перезволоженні (опір зрушенню) та збільшення ваги насиченого водою шару ґрунту. При цьому тривалість формування та реалізація зсуву залежить від кількох факторів: інтенсивності та тривалості опадів, стану ґрунтового масиву, морфометричних характеристик та попередніх погодних умов (Dahal, & Hasegawa, 2008; Guzzetti et al., 2007; Li et al., 2025).

Вирішальним у порушенні рівноваги на схилах Дніпра в останні 40–50 років стали *техногенні впливи*. Розвитку зсувних переміщень сприяють нищення деревної рослинності, підрізка і привантаження схилів, організація газонних покриттів з подальшим рясним поливом, додаткове зволоження порід унаслідок витоків з інженерних мереж водогонів. Наприклад, у 2017–2019 рр. при будівництві II черги Національного меморіального комплексу пам'яті жертв Голодомору в Україні будівельники стикнулися з проблемою дуже сильного притоку ґрунтових вод та ґрунтових мас до комунікаційної шахти при її облаштуванні. Проведені за участі автора Стрельцова А. О. (Карпенко, Маринич, & Стрельцов, 2019) дослідження показали, що ґрунтовий водоносний горизонт (I-й від поверхні) має потужне додаткове джерело живлення витоками аварійних резервуарів водопостачання Печерського району. Через це водний потік виносив у виробку велику кількість ґрунтового матеріалу з-за стінок шахти. Тому для виключення негативного впливу на навколишню територію, запобігання утворенню провалів, зниженню водопритоку виконувалося нагнітання (інжектування) водно-цементного розчину навколо шахти.

Проте окремі приклади благоустрою (озеленення й упорядкування поверхневого стоку) та застосування заходів з інженерного захисту схилів (підпірні стінки, дренажні системи тощо), впродовж останніх 60–80 рр. дали змогу стабілізувати ерозійно-гравітаційні процеси на більшій частині дніпровських схилів.

**Дискусія і висновки**

Територія досліджень розташована у складних інженерно-геологічних умовах на схилах долини Дніпра й прилеглих до неї ділянок лесового плато. Щільна система балок та ярів (52 яри завдовжки 6,5 км), особливості геологічних і гідрогеологічних умов, містобудівна діяльність призводили впродовж століть до розвитку низки небезпечних процесів на схилах, а саме: зсуви на різних геоморфологічних рівнях, просідання лесових відкладів, провали та суфозійний винос ґрунту навколо підземних споруд, підтоплення тощо. Значний внесок у стабілізацію зсувів дало озеленення методом народної будови у 50–60 рр. минулого століття. Натепер стабільність і збереження об'єктів на дніпровських схилах також забезпечується системою спеціальних утримуючих та водорегулюючих споруд інженерного захисту, на об'єктах всесвітньої спадщини (Києво-Печерська лавра) та відповідальних спорудах контролюється постійним моніторингом.

В результаті ретроспективного аналізу виявлено закономірності просторового і часового розвитку зсувів. Встановлено ділянки з найвищим рівнем зсувонебезпеки за величиною куту нахилу 15–25°, які займають 25–34 % по площі залежно від ділянки схилу (Давнього Києва, Центральної, Залаврської). Найбільший відсоток зсувних процесів пов'язаний із глинистими грунтами черво-бурої, строкатої товщ, а також спондилових глин київської світи.

Наявність активних зсувів та зсувонебезпечних ділянок за останні 10 років, зафіксованих СУППР-ом та

виявлених при польових обстеженнях, свідчить про обмежену ефективність наявних протизсувних заходів у довгостроковій перспективі. Їх експлуатаційна здатність істотно знижується за відсутності комплексного системного підходу до управління схиловими процесами, належного технічного обслуговування та дотримання відповідності проєктним характеристикам.

Встановлено, що найбільший вплив на зниження стійкості системи схилів мають такі чинники: водонасичення ґрунтів (атмосферними опадами, витоками з мереж водогону), привантаження схилів у процесі забудови, інженерні втручання без урахування інженерно-геологічних особливостей та динамічні навантаження (транспорт, будівельні роботи). Проаналізовано сукупний вплив зазначених чинників і систематизовано наслідки їх взаємодії, що призводять до втрати стійкого стану схилу.

Розташування в межах досліджуваної території об'єктів архітектурної, історико-археологічної та природної спадщини, об'єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО та їх буферних зон зумовлює необхідність перегляду методів контролю та прогнозування схилових процесів, управління ризиками небезпеки.

У роботі визначено напрямки концептуальних засад системного підходу до забезпечення стійкості дніпровських схилів, що передбачають узгоджене застосування інженерно-геологічного моніторингу, актуалізації інженерно-геологічного районування дніпровського схилу та ранжування за рівнем ризиків зсувної небезпеки на основі сучасних програмних математико-аналітичних комплексів, опрацювання принципів раціонального містобудівного планування на схилах та оптимізації протизсувних заходів з обов'язковим урахуванням історико-культурної цінності досліджуваної території.

**Внесок авторів**: Тетяна Кріль – концептуалізація, методологія, графічні побудови, написання (перегляд і редагування); Антон Стрельцов – методологія, польові дослідження, графічні побудови, формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка).

**Список використаних джерел**

Барщевский, Н. Е., Купраш, Р. П., & Швыдкий, Ю. Н. (1989). *Геоморфология и рельефообразующие отложения г. Киева*. Наукова думка.

Грушевський, М. С. (1992). *Історія України-Руси* (Т. 2). Наукова думка.

Демчишин, М. Г. (1992). *Современная динамика склонов на территории Украины*. Наукова думка.

Демчишин, М. Г., & Анацький, О. М. (2007). Особливості розвитку ерозійно-гравітаційних деформацій на ділянці схилу, прилеглій до парку Вічної слави в м. Київ. *Геологічний журнал*, 1, 133–139.

Демчишин, М. Г., & Лапинский, В. П. (1979). Проявление экзогенных геологических процессов в рельефе Киевского плато на современном этапе. В *Инженерно-геологические свойства грунтов и характеристика геодинамических процессов* (с. 32–40). Наукова думка.

ІГН НАН України. (М. Г. Демчишин, кер.). (2012). *Інженерно-геологічна та гідрогеологічна ситуація та інженерний захист на території Заповідника та його буферної зони*. Звіт про науково-дослідну роботу.

Інститут геологічних наук НАН України. (М. Г. Демчишин, кер.). (2006). *Геологічне середовище території центральної історичної частини м. Києва (інженерно-геологічні аспекти)*. Науковий звіт.

*Історико-архітектурний опорний план м. Києва з визначенням зон охорони пам'яток та історичних ареалів*. (2015). http://kyiv-landuse.com/sites/default/files/том%209.1%20Книга%202%20Поясн%20зап%2C%20Звіт%2019.01.16%20269c_0.pdf (Переглянуто 07 лютого 2025).

Кагамлик, С. (Упоряд.). (2008). *Архів Києво-Печерської лаври та заповідника: Вип. 1. ЦДІАК України. Ф. 128, Києво-Печерська лавра* (Оп. 1 заг., Спр. 30, Пл. 14, Арк. 71). Національний Києво-Печерський історико-культурний заповідник. https://cdiak.archives.gov.ua/files/Arkhiv_Kyyevo-Pecherskoi_lavry_predmetno-tematychnyy_pokazhchyk.pdf

Карпенко, Ю., Маринич, О., & Стрельцов, А. (2019). *Технічний звіт про інженерно-геологічні вишукування: Інженерно-геофізичні та інженерно-геологічні вишукування*. ТОВ "Основа-Солсиф".

Київвласть. (б.д.). http://kievvlast.com.ua/project/resources/attachments/ZSkJJyjj.pdf (Переглянуто 07 січня 2025).

Київська міська державна адміністрація. (2016, 29 березня). *Захист територій Києва від зсувів здійснюватимуть із урахуванням останніх наукових досліджень*. https://kyivcity.gov.ua/news/zakhist_teritoriy_kiyeva_vid_zsuviv_zdiysnyuvatimut_iz_urakhuvanyam_ostannikh_naukovikh_doslidzhen/ (Переглянуто 09 лютого 2025).

Киричко, И. М. (1957). *Строительство дренажей мелкого заложения в оползневых районах (Обобщение и анализ опыта строительства дренажей на примерах Киевских оползней)* [Автореферат дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук, КИСИ].

Колот, Э. И., Кузишина, Л. П., Кутовой, В. И., Лаврик, В. Ф., Мараховская, И. И., Селин, Ю. И., Соловицкий, В. Н., & Шестопалова, Е. В. (1984). *Геологическая карта Украинской ССР масштаба 1:50 000. Киевский промышленный район*. (Объясн. зап. в 2 ч. Ч. 2). Киев.

Кондратенко, Н. В., & Марчук, Ю. М. (1965). *Отчет по работам Киевской оползневой станции за 1964 г.* (Т. 1). Инв. ном. 25253.

Котлов, Ф. В., Сипягина, И. К., & Баршина, И. А. (1964). *Отчет по теме 7: "Оценка и методы изучения инженерно-геологических процессов и явлений на территории городов и промышленных центров в связи с новым строительством"* (Т. 1). Инв. ном. 25278.

Кутас, В. В., & Омельченко, В. Д. (2008). Интенсивность сотрясений в разных районах Киева при карпатском землетрясении 30 мая 1990 г. *Геофизический журнал*, 30(3), 34–48.

Личков, Б. Л. (1928). К вопросу о террасах Днепра. *Вісник Українського відділу геологічного комітету*, II, 51–84.

Лічков, Л. С. (1938). До питання про режим зсувних явищ в районі розташування м. Києва та його околиць. *Геологічний журнал*, V(4), 145–194.

Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В., & Філіпович, В. Є. (2017). Супутниковий моніторинг розвитку зсувних процесів у Придніпровській зоні м. Київ. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 15, 11–22.

Майко, М. І., Гончарук, А. П., Кузьменко, Е. Д., & Штогрин, Л. В. (2002). *Проміжний звіт по оцінці зсувонебезпечності та стійкості підґрунтя важливих інженерних споруд та історико-культурних пам'яток на правобережному схилі р. Дніпро в м. Києві*. Звіт комплексної геофізичної партії за 1998–2002 рр.

Міністерство культури та стратегічних комунікацій України. (2024). *Перелік пам'яток культурної спадщини національного значення м. Києва, занесених до Державного реєстру нерухомих пам'яток України станом на 20.08.2024 р.* (Переглянуто 07 лютого 2025). https://mcsc.gov.ua/wp-content/uploads/2024/08/m.-kyyiv_-stanom-na-20.08.2024.pdf

Міністерство культури та стратегічних комунікацій України. *Опорний план Києва.* (б.д.). https://mcsc.gov.ua/announcements/opornyj-plan-kyyeva (Переглянуто 07 лютого 2025).

Мінрегіонбуд України. (2014). *Будівництво в сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2014.* (Держ. будів. норми України). https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/303807715589750980 4/2023-10-10/426eb62f-0d54-4e90-813b-09b5fcd5d5df.pdf

Оппоков, Є. (1934). Київські берегові осуви та боротьба з ними. *Геологічний журнал*, I(1), 40–60.

*Перелік зсувонебезпечних ділянок м. Київ*. (2018). (Відповідь Київської міської державної адміністрації на запит Інформаційно-аналітичного видання "КиевВласть" від 12.10.2018 № 0234). http://kievvlast.com.ua/project/resources/attachments/ZSkJJyjj.pdf (Переглянуто 05 травня 2025).

Подгайная, Е. А. (1958). *Сводный отчет по работам Северо-Украинской государственной гидрогеологической станции за период 1945–1955 гг. (по Центральному участку г. Киева оползневая группа)* (Кн. I, кн. II). Инв. ном. 19253.

*Про Перелік пам'яток культурної спадщини, що не підлягають приватизації*: Закон України від 23 вересня 2008 року № 574-VI. (2008). https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/574-17#Text (Переглянуто 07 лютого 2025).

Тутковский, П. А. (1895). Киевские оползни. *Юго-западный край*, 2, 49–56.

Феофилактов, К. М. (1882). Приднепровские оползни и обвалы в Киеве. *Записки Киевского общества естествоиспытателей*, VI(2).

Філіпович, В., Ліщенко, Л., & Пазинич, Н. (2019). Створення ГІС розвитку зсувних процесів в межах м. Києва в режимі моніторингу на основі використання багатозональних космічних даних високого просторового розрізнення. У *Картографічне моделювання та географічні інформаційні системи: зб. матеріалів доп. учасн. всеукр. наук.-практ. конф.* (с. 116–119).

Черный, Г. И. (1979). *Изменения физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках*. Наукова думка.

Шутенко, Л. Н., Лупан, Ю. Т., Клемяционок, П. Л., Рудь, А. Г., Стижельчик, Г. Г., & Жиров, А. В. (2004). *Основания и фундаменты*. ХНАГХ.

Abdelmonem, H. H., Abo Bakr, M., & Saad Eldin, M. (2023). Influence of water content on the shear strength parameters for cohesive soil. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 18, 529–540. https://doi.org/10.21608/auej.2023.310316

Dahal, R. K., & Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3–4), 429–443. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.014

Demchyshyn, M. G., & Kril, T. V. (2019). Improvement of the Engineering Protection Systems of the Kyiv-Pechersk Lavra Reserve Territory. *Nauka i Innovacii*, 15(3), 37–51. https://doi.org/10.15407/scin15.03.037

Filipovych, V., Lischenko, L., & Marhes, S. (2023). Methodology for Assessing and Forecasting the Landslide Hazard on the Territory on the Dnieper Landslide Zone in the City on Kyiv Based on Satellite Data. *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities*, 2023, 1–5. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe.

*Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, 239–267. https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7

Kril, T. V., & Streltsov, A. O. (2025). Identification of landslide hazard boundaries of the Dnipro slope near Mykilska Brama, Kyiv. *Geological Journal (Ukraine)*, 1(390), 44–55. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.1.322779

Kril, T., & Shekhunova, S. (2019). Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. *13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176

Li, X., Guo, C., Chen, W., Wei, P., Jin, F., Yan, Y., & Liu, G. (2025). Deformation Mechanisms and Rainfall Lag Effects of Deep-Seated Ancient Landslides in High-Mountain Regions: A Case Study of the Zhongxinrong Landslide, Upper Jinsha River. *Remote Sensing*, 17(4), 687. https://doi.org/10.3390/rs17040687

UNESCO. (б.д.). *Kyiv: Saint-Sophia Cathedral and Related Monastic Buildings, Kyiv-Pechersk Lavra*. Retrieved May 5, 2024, from https://whc.unesco.org/en/list/527/maps/

Wang, C., Yang, W., Zhang, N., Wang, S., Ma, C., Wang, M., & Zhang, Z. (2024). Effect of Moisture Content and Wet–Dry Cycles on the Strength Properties of Unsaturated Clayey Sand. *Buildings*, 14(5), 1375. https://doi.org/10.3390/buildings14051375

Wu, W., Guo, S., & Shao, Z. (2023). Landslide risk evaluation and its causative factors in typical mountain environment of China: a case study of Yunfu City. *Ecological Indicators*, 154, 110821. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110821

**References**

Abdelmonem, H. H., Abo Bakr, M., & Saad Eldin, M. (2023). Influence of water content on the shear strength parameters for cohesive soil. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 18, 529–540. https://doi.org/10.21608/auej.2023.310316

Barschevskyi, N. E., Kuprash, R. P., & Shvydkyi, Yu. N. (1989). *Geomorphology and relief-forming deposits of Kyiv*. Naukova Dumka [in Russian].

Chernyi, H. I. (1979). *Changes in physical and mechanical properties of soils under dynamic loads*. Naukova Dumka [in Russian].

Dahal, R. K., & Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100(3–4), 429–443. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.01.014

Demchyshyn, M. G. (1992). *Modern slope dynamics in the territory of Ukraine*. Naukova Dumka [in Russian].

Demchyshyn, M. G., & Anatskyi, O. M. (2007). Peculiarities of the development of erosional-gravitational deformations on the slope near the Park of Eternal Glory in Kyiv. *Geological Journal*, 1, 133–139 [in Ukrainian].

Demchyshyn, M. G., & Kril, T. V. (2019). Improvement of the Engineering Protection Systems of the Kyiv-Pechersk Lavra Reserve Territory. *Nauka i Innovacii*, 15(3), 37–51. https://doi.org/10.15407/scin15.03.037

Demchyshyn, M. G., & Lapinskyi, V. P. (1979). Manifestations of exogenous geological processes in the relief of the Kyiv plateau at the present stage. In *Engineering-geological properties of soils and characteristics of geodynamic processes* (pp. 32–40). Naukova Dumka [in Russian].

Feofilaktov, K. M. (1882). Dnipro landslides and collapses in Kyiv. *Notes of the Kyiv Society of Naturalists*, 6(2) [in Russian].

Filipovych, V., Lischenko, L., & Marhes, S. (2023). Methodology for Assessing and Forecasting the Landslide Hazard on the Territory on the Dnieper Landslide Zone in the City on Kyiv Based on Satellite Data. In *Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities* (Vol. 2023, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023500007

Filipovych, V., Lishchenko, L., & Pazynych, N. (2019). Creation of a GIS for monitoring landslide development in Kyiv based on high-resolution multispectral satellite data. In *Cartographic Modeling and Geographic Information Systems: Collection of Conference Papers of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference* (pp. 116–119) [in Ukrainian].

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorological and Atmospheric Physics*, 98, 239–267. https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7

*Historical and architectural master plan of Kyiv with identification of monument protection zones and historical areas*. (2015). http://kyiv-landuse.com/sites/default/files/том%209.1%20Книга%202%20Пояснювальна%2C%203звіт%2019.01.16%20269c_0.pdf (Retrieved February 07, 2025) [in Ukrainian].

Hrushevskyi, M. S. (1992). *History of Ukraine-Rus* (Vol. 2). Naukova Dumka [in Ukrainian].

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine. (M. H. Demchyshyn, Project leader). (2006). *The geological environment of the central historical part of Kyiv (engineering-geological aspects)*. Scientific report [in Ukrainian]

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine. (M. H. Demchyshyn, Project leader). (2012). *Engineering-geological and hydrogeological situation and engineering protection of the territory of the Reserve and its buffer zone*. Research report [in Ukrainian].

Kagamlyk, S. R. (Ed.). (2008). *Archives of the Kyiv-Pechersk Lavra and Reserve: Issue 1. Central Archive of the Ukrainian Historical and Cultural Heritage. Fund 128, Kyiv-Pechersk Lavra (*General Inventory 1, Case 30, Sheet 14, Folio 71). National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve. https://cdiak.archives.gov.ua/files/Arkhiv_Kyyevo-Pecherskoi_lavry_predmetno-tematychnyy_pokazhchyk.pdf [in Ukrainian].

Karpenko, Yu., Marynych, O., & Streltsov, A. (2019). *Technical report on engineering-geological surveys: Engineering-geophysical and engineering-geological investigations*. LLC "Osnova-Solsif" [in Ukrainian].

Kolot, E. I., Kuzishina, L. P., Kutovyi, V. I., Lavryk, V. F., Marakhovska, I. I., Selin, Yu. I., Solovytskyi, V. N., & Shestopalova, Ye. V. (1984). *Geological map of the Ukrainian SSR at a scale of 1:50,000. Kyiv Industrial District*. (Explanatory note in 2 parts. Part 2). Kyiv [in Russian].

Kondratenko, N. V., & Marchuk, Yu. M. (1965). *Report on the work of the Kyiv Landslide Station for 1964* (Vol. 1). Inventory No. 25253 [in Russian].

Kotlov, F. V., Sipyahina, I. K., & Barshyna, I. A. (1964). *Report on Topic 7: "Assessment and methods of studying engineering-geological processes and phenomena in cities and industrial centers in connection with new construction"* (Vol. 1). Inventory No. 25278 [in Russian].

Kril, T. V., & Streltsov, A. O. (2025). Identification of landslide hazard boundaries of the Dnipro slope near Mykilska Brama, Kyiv. *Geological Journal (Ukraine)*, 1(390), 44–55. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2025.1.322779

Kril, T., & Shekhunova, S. (2019). Terrain elevation changes by radar satellite images interpretation as a component of geo-environmental monitoring. In *13th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903176

Kutas, V. V., & Omelchenko, V. D. (2008). Intensity of ground shaking in different districts of Kyiv during the Carpathian earthquake on May 30, 1990. *Geophysical Journal*, 30(3), 34–48 [in Russian].

Kyiv City State Administration. (2016). *Protection of Kyiv's territories from landslides will be carried out considering the latest scientific research* [in Ukrainian]. https://kyivcity.gov.ua/news/zakhist_teritoriy_kiyeva_vid_ zsuviv_ zdiysnyuvatimut_iz_urakhuvanyam_ostannikh_naukovikh_doslidzhen/ (Retrieved February 09, 2025).

*KyivVlast*. (n.d.). [in Ukrainian] http://kievvlast.com.ua/project/resources/attachments/ZSkJJyjj.pdf (Retrieved January 07, 2025).

Kyrychko, I. M. (1957). *Construction of shallow drainage systems in landslide-prone areas (Summary and analysis of drainage construction experience based on Kyiv landslides)* [Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences, KISI] [in Russian].

Li, X., Guo, C., Chen, W., Wei, P., Jin, F., Yan, Y., & Liu, G. (2025). Deformation Mechanisms and Rainfall Lag Effects of Deep-Seated Ancient Landslides in High-Mountain Regions: A Case Study of the Zhongxinrong Landslide, Upper Jinsha River. *Remote Sensing*, 17(4), 687. https://doi.org/10.3390/rs17040687

Lichkov, L. S. (1938). On the regime of landslide phenomena in Kyiv and its outskirts. *Geological Journal*, 5(4), 145–194 [in Ukrainian].

Lishchenko, L. P., Pazynych, N. V., & Filipovych, V. Ye. (2017). Satellite monitoring of landslide processes in the Dnipro zone of Kyiv. *Ukrainian Journal of Remote Sensing of Earth*, 15, 11–22 [in Ukrainian].

*List of landslide-prone areas in Kyiv, response from the Kyiv City State Administration to the request of the information-analytical publication "KyivVlast" dated October 12, 2018, No. 0234*. (2018) [in Ukrainian]. http://kievvlast.com.ua/project/resources/attachments/ZSkJJyjj.pdf (Retrieved May 05, 2025).

Lychkov, B. L. (1928). On the question of the Dnipro terraces. *Bulletin of the Ukrainian Division of the Geological Committee*, II, 51–84 [in Russian].

Maiko, M. I., Honcharuk, A. P., Kuzmenko, E. D., & Shtohryn, L. V. (2002). *Interim report on the assessment of landslide hazard and subsoil stability under important engineering structures and historical monuments on the right-bank slope of the Dnipro in Kyiv*. Report of the Comprehensive Geophysical Party for 1998–2002 [in Ukrainian].

*Master Plan of Kyiv*. Ministry of Culture and Information Policy of Ukraine. (n.d.). https://mcsc.gov.ua/announcements/opornyj-plan-kyyeva (Retrieved January 07, 2025) [in Ukrainian].

Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine. (2014). *Construction in seismic areas of Ukraine: DBN V.1.1-12:2014*. (State Building Codes of Ukraine). https://e-construction.gov.ua/files/new_doc/3038077155897509804/2023-10-10/426eb62f-0d54-4e90-813b-09b5fcd5d5df.pdf [in Ukrainian].

Ministry of Culture and Strategic Communications of Ukraine. (2024). *List of cultural heritage monuments of national importance in Kyiv, registered in the State Register of Immovable Monuments of Ukraine as of August 20, 2024*. (Retrieved February 07, 2025). https://mcsc.gov.ua/wp-content/uploads/2024/08/m.-kyyiv_-stanom-na-20.08.2024.pdf [in Ukrainian]

*On the List of Cultural Heritage Monuments Not Subject to Privatization*: Law of Ukraine dated September 23, 2008, No. 574-VI. (2008) [in Ukrainian]. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/574-17#Text (Retrieved February 07, 2025).

Oppokov, Ye. (1934). Kyiv landslides and the fight against them. *Geological Journal*, 1(1), 40–60 [in Ukrainian].

Podhainaya, E. A. (1958). *Summary report of the North Ukrainian State Hydrogeological Station for 1945–1955 (Central area of Kyiv, landslide group)* (Vol. I, II). Inventory No. 19253 [in Russian].

Shutenko, L. N., Lupan, Yu. T., Klem'yatsionok, P. L., Rud, A. H., Stizhelchyk, H. H., & Zhyrov, A. V. (2004). *Foundations and bases*. NUUEKh [in Russian].

Tutkovskyi, P. A. (1895). Kyiv landslides. *Southwestern Krai*, 2, 49–56 [in Russian].

UNESCO. (б.д.). *Kyiv: Saint-Sophia Cathedral and Related Monastic Buildings, Kyiv-Pechersk Lavra*. Retrieved May 5, 2024. https://whc.unesco.org/en/list/527/maps/

Wang, C., Yang, W., Zhang, N., Wang, S., Ma, C., Wang, M., & Zhang, Z. (2024). Effect of Moisture Content and Wet–Dry Cycles on the Strength Properties of Unsaturated Clayey Sand. *Buildings*, 14(5), 1375. https://doi.org/10.3390/buildings14051375

Wu, W., Guo, S., & Shao, Z. (2023). Landslide risk evaluation and its causative factors in typical mountain environment of China: a case study of Yunfu City. *Ecological Indicators*, 154, 110821. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110821

**Отримано редакцією журналу / Received: 10.06.25**
**Прорецензовано / Revised: 07.08.25**
**Схвалено до друку / Accepted: 16.12.25**

**Tetiana KRIL, PhD (Geol.), Senior Researcher**
**ORCID ID: 0000-0002-4324-9231**
**e-mail: kotkotmag@gmail.com**
**Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine**

**Anton STRELTSOV, PhD Student**
**ORCID ID: 0009-0008-5394-8731**
**e-mail: streltsov.kiev.ua@gmail.com**
**Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine**

## ENGINEERING–GEOLOGICAL CONDITIONS OF THE DNIPRO SLOPES IN THE CENTRAL AREA OF KYIV: A RESEARCH RETROSPECTIVE AND ANALYSIS OF LANDSLIDE HAZARD FACTORS

**Background.** ***This article presents the results of an analysis of the engineering-geological conditions of the Dnipro slopes within the central historical area of Kyiv. The main objective of the study is to identify natural and anthropogenic factors influencing the development of landslide processes, as well as to form a contemporary understanding of the conditions necessary to ensure the stability of the natural system in the study area.***

**Methods.** ***To determine the dynamics of landslide development on the Dnipro slopes of Kyiv, a retrospective analysis of landslide-prone areas was conducted. This included photographic documentation of the current slope conditions and comparison with images from archival sources. The analysis of engineering-geological conditions and the factors driving landslide displacements was carried out using analytical, statistical, and cartographic methods. Geographic Information Systems (GIS), including ArcGIS and Surfer software, were used to construct cartographic models. Engineering-geological cross-sections were developed using AutoCAD tools.***

**Results.** ***The periods of scientific research on landslide hazards of the Dnipro slopes and efforts to stabilize them have been systematized, identifying five key research stages, including those conducted in the modern era since Ukraine's independence. Based on the understanding of the factors contributing to landslide development within the study area, three zones were identified and their engineering-geological characteristics were described. Areas with the highest landslide hazard were determined by slope angles ranging from 15 to 25°, occupying between 25 % and 34 % of the surface area depending on the specific slope section (Old Kyiv, Central, Zalavrskyi). It was established that the most significant factors contributing to the reduction of slope system stability are: soil water saturation (due to atmospheric precipitation and leakage from water supply networks), additional loading of slopes during urban development, engineering interventions without consideration of engineering-geological specifics, and dynamic loads (from transportation and construction activities). The cumulative impact of these factors was analyzed, and the consequences of their interaction were systematized, showing that they collectively lead to the destabilization of the slope system.***

**Conclusions.** ***Based on the results, directions for the conceptual foundations of a systematic approach to ensuring the stability of the Dnipro slopes have been formulated. This approach involves the coordinated application of engineering-geological monitoring, the updating of engineering-geological zoning of the Dnipro slope, and the risk-based ranking of landslide hazards. It also includes the development of principles for rational urban planning on slopes and the optimization of anti-landslide measures, with mandatory consideration of the historical and cultural value of the study area.***

**Keywords:** ***engineering-geological conditions, Dnipro slopes, landslides, landslide hazard factors, historical areas.***

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

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

**Наукове видання**

# ВІСНИК

## КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

# ГЕОЛОГІЯ

**Випуск 4(111)**

**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. 22,16. Ум. друк. арк. 17,55. Наклад 300. Зам. № 225-11596.**
**Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл4.**
**Підписано до друку 29.12.25**

**Видавець і виготовлювач**
**ВПЦ "Київський університет"**
**Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030**
**☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; (38044) 239 31 28**
**e-mail: vpc@knu.ua**
**http: vpc.knu.ua**
**Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02**