

УДК 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109>

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

|                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР<br/>РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ</b> | <b>Вижва Сергій, д-р геол. наук, проф. (Україна)</b><br><b>Албані Абдер Ель, д-р філософії, проф. (Франція); Бахмутов Володимир, д-р геол. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Бондар Ксенія, д-р геол. наук (Польща); Веснавер Альдо, д-р філософії, проф. (Італія); Вижва Зоя, д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); Діндароглу Тургай, д-р філософії, проф. (Туреччина); Де Донатіс Мауро, д-р філософії, доц. (Італія); Дубина Олександр, д-р геол. наук, доц. (Україна); Загнітко Василь, д-р геол.-мінералог. наук, проф. (Україна); Зацерковний Віталій, д-р техн. наук, проф. (Україна); Зенг Квінглі, д-р філософії (Китай); Іванік Олена, д-р геол. наук, проф. (Україна); Івахненко Олександр, д-р філософії, проф. (Казахстан); Карпенко Олексій, д-р геол. наук, проф. (Україна); Коронеос Антоніс, д-р філософії, проф. (Греція); Кошляков Олексій, д-р геол. наук, проф. (Україна); Курило Марія, д-р геол. наук, доц. (Україна); Лі Циншен, д-р філософії, проф. (Китай); 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. (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 Вольфмар, д-р філософії, проф. (Німеччина); Шнюков Сергій, д-р геол. наук, доц. (Україна)</b> |
| <b>Адреса редколегії</b>                        | <b>ННІ "Інститут геології"</b><br>вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022<br>☎ (38044) 521 33 38<br>e-mail: <a href="mailto:geology.bulletin@knu.ua">geology.bulletin@knu.ua</a> ; <a href="mailto:geolvisnyk@ukr.net">geolvisnyk@ukr.net</a><br>web: <a href="https://geology.bulletin.knu.ua">https://geology.bulletin.knu.ua</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Затверджено</b>                              | <b>вченою радою ННІ "Інститут геології"</b><br><b>23.04.25 (протокол № 13)</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Зареєстровано</b>                            | <b>Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення</b><br><b>Рішення № 1089 від 28.03.24</b><br><b>Ідентифікатор друкованого медіа: R30-03800</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Атестовано</b>                               | <b>Міністерством освіти і науки України (категорія А)</b><br><b>Наказ № 1412 від 18.12.18</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Індексування</b>                             | <b>Scopus (квартиль 3, SJR 0.238), Web of Science (квартиль 4, імпакт фактор 0.3), EBSCO, Academic Resource Index ResearchBib, Google Scholar</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Засновник та видавець</b>                    | <b>Київський національний університет імені Тараса Шевченка</b><br><b>Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет"</b><br><b>Свідоцтво про внесення до Державного реєстру</b><br><b>ДК № 1103 від 31.10.02</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Адреса видавця</b>                           | <b>ВПЦ "Київський університет"</b><br><b>б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601</b><br>☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28<br>e-mail: <a href="mailto:vpcc@knu.ua">vpcc@knu.ua</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

# BULLETIN

TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

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

**GEOLOGY**

**2(109)/2025**

**Established in 1958**

UDC 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109>

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>EDITOR-IN-CHIEF</b>       | Vyzhva Sergiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>EDITORIAL BOARD</b>       | Albani Abderrazak El, PhD, Prof. (France); Bakhmutov Volodymyr, DSc (Geol.), Senior Researcher (Ukraine); Bondar Kseniia, DSc (Geol.) (Poland); Dindaroğlu Turgay, PhD, Prof. (Turkey); De Donatis Mauro, PhD, Assoc. Prof. (Italy); Dubyna Oleksandr, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Ivakhnenko Oleksandr, PhD, Prof. (Kazakhstan); Ivanik Olena, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Karpenko Oleksiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); 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); Liu Qingsheng, PhD, Prof. (China); 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. (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); Zeng Qingli, PhD (China) |
| <b>Address</b>               | USI "Institute of Geology"<br>90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022<br>☎ (38044) 521 33 38<br>e-mail: <a href="mailto:geology.bulletin@knu.ua">geology.bulletin@knu.ua</a> , <a href="mailto:geolvisnyk@ukr.net">geolvisnyk@ukr.net</a><br>web: <a href="https://geology.bulletin.knu.ua">https://geology.bulletin.knu.ua</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Approved by</b>           | the Academic Council of the USI "Institute of Geology"<br>23.04.25 (protocol № 13)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Registered by</b>         | the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine<br>Decision № 1089 of 28.03.24<br>Identifier of printed media: R30-03800                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Certified by</b>          | the Ministry of Education and Science of Ukraine (category A)<br>Order № 1412 dated 18.12.18                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <b>Indexing</b>              | Scopus (Quartile 3, SJR 0.238), Web of Science (Quartile 4, Impact Factor 0.3), EBSCO, Academic Resource Index ResearchBib, Google Scholar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Founded and published</b> | 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                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Address</b>               | PPC "Kyiv University"<br>14, Taras Shevchenko blvd., Kyiv, 01601<br>☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28<br>e-mail: <a href="mailto:vpc@knu.ua">vpc@knu.ua</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

**ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ****ДЕРНОВ Віталій**

|                                                                                                                                 |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Нова знахідка філокариди (Crustacea: Phyllocarida) в серпуховських відкладах (міссісіпій)<br>Донецького басейну (Україна) ..... | 5 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|

**ГНІДЕЦЬ Володимир, ГРИГОРЧУК Костянтин, РЕВЕР Анастасія, КОХАН Оксана**

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Літологічна будова та фаціальні особливості керлеутських відкладів Причорноморського мегапрогину ..... | 10 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ГЕОФІЗИКА****ВИЖВА Сергій, ВЕНГРОВИЧ Дмитро, ОНИЩУК Віктор, ОНИЩУК Іван, ДАЦЕНКО Анна**

|                                                                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Фізичне моделювання процесу протікання нафти через породу-колектор у пластових умовах<br>(на прикладі пісковиків Розумівського газоконденсатного родовища) ..... | 22 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ПЕТРОКУШИН Олег, БЕЗРОДНА Ірина**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Імпульсний нейтронний каротаж у світі та в Україні: витоки, становлення, сучасність ..... | 31 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**В'ЯЗОВСЬКА Євгенія, МИХАЛЕВИЧ Ігор, КАРПИН Василь, ДУЧУК Степан**

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Достовірність прогнозування газоносності колекторів у Більче-Волицькій зоні за даними станції ГТД ..... | 40 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**СЕІДОВ Вагіф Мірғамза, АГАЄВА Малейка Ага Алі**

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Визначення оптимального методу впливу для підвищення ефективності розвідки родовищ ..... | 45 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**МЕНЬШОВ Олександр, ГОРОШКОВА Лідія, ГОРОШКОВ Станіслав, ДІНДАРОГЛУ Тургай**

|                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Комплексна модель вмісту важких металів та магнітних властивостей ґрунтів<br>та донних відкладів озер заповідника "Хортиця" ..... | 51 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**МАЛИЦЬКИЙ Дмитро, АСТАШКІНА Олександра, ПАК Руслан, ГНИП Андрій, ДОБУШОВСЬКИЙ Маркіян**

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Визначення параметрів вогнища землетрусу за даними обмеженої кількості сейсмічних станцій ..... | 59 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ****МЕКТІ Зохір, БУТЕМЕДДЖЕТ Асія, ТАХРІ Туркія, БЕНСЕЛЬГУБ Айсса,****СОЛІМАН Абдельмохсен М., БЕЛЛУЧЧІ Стефано**

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Петрографічна характеристика уранової руди Тахагарт (Ель-Хоггар, Південний Алжир) ..... | 64 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН****БУРЛУЦЬКИЙ Микола, ЛИТВИНЮК Станіслав**

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Генезис та геохімічні особливості рідкіснометалічного зруденіння у бурому вугіллі Закарпаття ..... | 73 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ****ШАРІКОВ Сергій, ЧОМКО Дмитро**

|                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перспективи збільшення ресурсного потенціалу мінеральних радонових вод у Вінницькій області ..... | 82 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**МІХАЛКОВА Ніна, УДАЛОВ Ігор**

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Аналіз чинників екологічної небезпеки для накопичувача ТОВ "Рубіжанський краситель" ..... | 88 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ЕКОНОМІЧНА ГЕОЛОГІЯ****ЗУР'ЯН Олексій, ТОЛКУНОВ Андрій, ОМЕЛЬЧЕНКО Тетяна**

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Врахування ризику при дослідженні інвестиційної привабливості об'єктів геотермальної енергетики ..... | 97 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

**ГЕОІНФОРМАТИКА****СТАХІВ Ірина, ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій, ДЕ ДОНАТІС Мауро,****ПАСТУШЕНКО Тетяна, ГОРДІЙЧУК Софія, МАЛІК Тетяна**

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Просторовий аналіз площ підтоплених земель природно-заповідного фонду<br>Херсонської області за даними дистанційного зондування Землі ..... | 104 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

---

## CONTENTS

---

### GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

#### **DERNOV Vitaly**

- A new record of the phyllocarid crustacean (crustacea: phyllocarida) in the serpukhovian (mississippian) of the Donets basin, Ukraine.....5

#### **HNIDETS Volodymyr, HRYHORCHUK Kostiantyn, REVER Anastasiia, KOKHAN Oksana**

- Lithological structure and facies features of the kerleutian sediments of the Black sea megadepression .....10

### GEOPHYSICS

#### **VYZHVA Serhii, VENGROVICH Dmytro, ONYSHCHUK Viktor, ONYSHCHUK Ivan, DATSENKO Anna**

- Physical modeling of the process of oil flow through the reservoir sandstone rock samples in the reservoir conditions (Rozumivske gas condensate field) .....22

#### **PETROKUSHYN Oleh, BEZRODNA Iryna**

- Pulsed neutron logging in the world and in Ukraine: beggining, establishment, present .....31

#### **IAZOVSKA Yevheniia, MYKHALEVYCH Ihor, KARPYN Vasyl, DUCHUK Stepan**

- Reliability of prediction of gas saturated reservoirs in Bilche-Volytsya zone using the mudlogging station data .....40

#### **SEIDOV Vagif, AGHAYEVA Maleyka**

- Determination of the optimal method of influence to increase the efficiency of reservoir exploration .....45

#### **MENSHOV Oleksandr, HOROSHKOVA Lidiia, HOROSHKOV Stanislav, DINDAROGLU Turgay**

- Comprehensive model of heavy metals content and magnetic properties of soil and sediments of lakes of Khortysya reserve.....51

#### **MALYTSKYI Dmytro, ASTASHKINA Oleksandra, PAK Ruslan, GNYP Andriy, DOBUSHOVSKYY Markiyan**

- Determination of earthquake source parameters based on data from a limited number of seismic stations .....59

### MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

#### **MEKTI Zohir, BOUTEMEDJET Assia, TAHRI Tourkia, BENSELHOUB Aissa,**

#### **SOLIMAN Abdelmohsen M., BELLUCCI Stefano**

- Petrographic characterization of the uranium ore of Tahaggar (El-Hoggar, Se Algeria) .....64

### MINERAL RESOURCES

#### **BURLUTSKYY Mykola, LYTVYNIUK Stanislav**

- Genesis and geochemical features of rare metal mineralization in the brown coal of Transcarpathia.....73

### HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

#### **SHARIKOV Sergii, CHOMKO Dmitro**

- Prospects for increasing the resource potential of mineral radon waters in the Vinnytska region.....82

#### **MIKHALKOVA Nina, UDALOV Igor**

- Analysis of factors of environmental hazard for the waste storage unit LLC "Rubizhanskyi krasytel" .....88

### ECONOMIC GEOLOGY

#### **ZURIAN Oleksii, TOLKUNOV Andriy, OMELCHENKO Tetiana**

- Risk considerations in the study of investment attractiveness of geothermal energy objects .....97

### GEOINFORMATICS

#### **STAKHIV Iryna, ZATSERKOVNYI Vitalii, DE DONATIS Mauro,**

#### **PASTUSHENKO Tetiana, HORDIICHUK Sofiya, MALIK Tetiana**

- Spatial analysis of the flooded land area of the Kherson region nature reserve using remote sensing data .....104



## A NEW RECORD OF THE PHYLLOCARID CRUSTACEAN (CRUSTACEA: PHYLLOCARIDA) IN THE SERPUKHOVIAN (MISSISSIPPIAN) OF THE DONETS BASIN, UKRAINE

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

**Background.** The Carboniferous phyllocarid crustaceans of the Donets Basin are not well studied and are represented by the genus *Dithyrocaris* and undefined remains referred to *Phyllocarida* indet. The study of fossil phyllocarids is of great palaeobiogeographical importance, at least for the Carboniferous marine palaeobasins of the northern hemisphere.

**Methods.** Two specimens of carapace valves of the phyllocarid *Ceratiocaris* sp. are examined in this study. The fossils originate from the Serpukhovian of the western Donets Basin, eastern Ukraine. The Serpukhovian deposits in the Donets Basin are represented by the Samara Formation and most of the Kalmis Formation, but it is impossible to determine which formation the studied material comes from.

**Results.** The described *Ceratiocaris* sp. is very similar to *Ceratiocaris truncatus* Woodward, 1871 in terms of the outline of the valve. However, there are some differences, namely: the described valve is somewhat wider compared to the *Ceratiocaris truncatus*, the line of the greatest width of the studied valve is between its centre and the anterior part, while in *Ceratiocaris truncatus* the ventral and anterior margins form a semi-elliptical line. The posterior margin of *Ceratiocaris* sp. is wider and more concave than that of *Ceratiocaris truncatus*, while the rostral notch is narrower and shallower. *Ceratiocaris* sp. differs from *Ceratiocaris oretonensis* Woodward, 1871, in the outline of the valve: in *C. oretonensis* it gradually narrows anteriorly, while in *C. sp.* it widens rapidly to about 33 % of the valve length and then sharply narrows. In addition, the posterior margin of *Ceratiocaris oretonensis* is much more concave and narrower.

**Conclusions.** In the Carboniferous succession of the Donets Basin, phyllocarids are predominantly distributed in the Bashkirian interval. Only two taxa, *Dithyrocaris granulata* doneziana Riabin, 1921 and *D. tricornis aisenvergi* Krestovnikov, 1961, occur from outside the Bashkirian interval, namely the Serpukhovian and Upper Pennsylvanian, respectively. Thus, today, Carboniferous phyllocarids in the Donets Basin are represented by only two genera, *Dithyrocaris* Scouler in Portlock, 1843 and *Ceratiocaris* M'Coy, 1849.

**Key words:** *Phyllocarida*, Mississippian, Serpukhovian, Donets Basin, Ukraine.

### Background

Phyllocarids (Phyllocarida Packard, 1879) constitute a relatively diverse group of crustaceans that are distributed nearly globally (Rolfe, 1969; Rode, & Lieberman, 2002; Briggs et al., 2011; Liu et al., 2023). The first appearance of Phyllocarida was during the Late Cambrian, and the group includes the extinct order Archaeostraca Claus, 1888, as well as the extant order Leptostraca Claus, 1880 (Collette, & Hagadorn, 2010).

The Carboniferous phyllocarid crustaceans of the Donets Basin are not well studied. Riabinin (1921) provided a description of *Dithyrocaris granulata* var. *doneziana* Riabin, 1921 from the D<sub>1</sub> limestone bed in the Serpukhovian part of the Kalmius Formation. Krestovnikov (1961) recorded three species of the genus *Dithyrocaris* Scouler in Portlock, 1843 across three distinct stratigraphic levels: *D. colei* Portlock, 1843 from the upper Bashkirian rocks recovered by the borehole No. 816 (depth interval 335.65–339.40 m) drilled near the town of Petropavlivka (Synel'nykove Rayon, Dnipropetrovsk Oblast), *D. tricornis* var. *aisenvergi* Krestovnikov, 1961 from the Upper Pennsylvanian strata recovered in the depth interval of 396.0–398.2 m by the borehole No. 9 drilled near the village of Oskil in Kharkiv Oblast, and *Chaenocaris tenuistriata* (M'Coy, 1844) (= *Dithyrocaris tenuistriata* M'Coy, 1844) from the lower Bashkirian Amvrosiyivka Formation in the borehole No. 2295 (depth interval 213.35–214.0 m), Pokrovs'k Rayon, Donetsk Oblast (Krestovnikov, 1961).

Dernov & Udovychenko (2019, fig. 2.5, 2.9) and Dernov (2023, fig. 3) figured specimens of *Dithyrocaris* sp. from the late Bashkirian-aged Mospyne Formation, which are exposed in the southern part of Luhansk Oblast. The poorly preserved specimens *Phyllocarida* indet. co-occured with probable phyllocarid resting traces belonging to *Hankoichnus bandersnatchi* Dernov, 2023 were described

from black shales of the lower Bashkirian part of the Dyakove Group in the southern part of Luhansk Oblast (Dernov, 2023; Dernov, & Poletaev, 2024).

The present paper presents the results of a study of newly discovered specimens of the phyllocarids *Ceratiocaris* sp. from the Serpukhovian coal-bearing paralic succession of the western Donets Basin (eastern Ukraine). The data obtained clarify the systematic diversity of Mississippian phyllocarid crustaceans of the Donets Basin. The study of fossil phyllocarids is of great palaeobiogeographical importance, at least for the Carboniferous palaeobasins of the northern hemisphere.

### Methods

Two moderately-well and poorly preserved specimens of carapace valves of the phyllocarid *Ceratiocaris* sp. preserved in black shale are examined in this study. The black shales were recovered at a depth interval of 875.0–876.3 m by the borehole No. 9240 drilled near the town of Kurakhove (Donetsk Oblast, eastern Ukraine) (Fig. 1A, B, D). According to the original field label, the strata recovered at the depth interval are of the Serpukhovian age (Fig. 1C).

The collector of the studied material is not known, but it is likely to be one of the local Donetsk geologists. In the 1980s, this material was transferred for study to the Department of Stratigraphy and Palaeontology of Palaeozoic Sediments, Institute of Geological Sciences of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR (now: Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv). The late Dr David Aisenverg classified these fossils as phyllocarids, but was unable to define their genus or species. Presently, the studied phyllocarids are part of a small collection of Serpukhovian–early Bashkirian fauna (NMNH-G 8637) stored in the Department of Geology, National Museum of Natural History of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv.

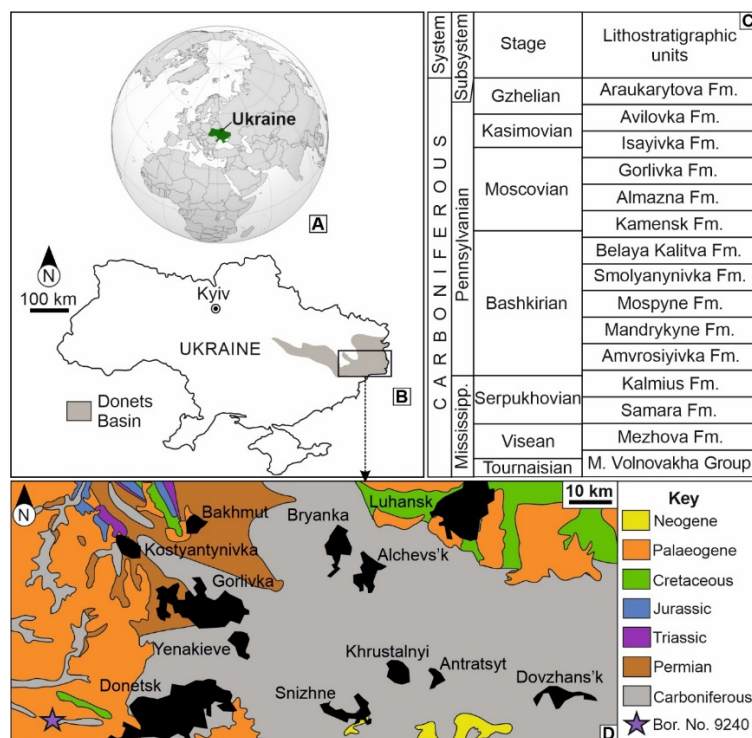


Fig. 1. Geographical location and stratigraphic position of the borehole No. 9240

A, B, D – maps showing general and specific geographical location of the borehole No. 9240.

C – Carboniferous stratigraphy of the Donets Basin. Abbreviations: Bor. – borehole, M. – Mokra, Mississipp. – Mississippian

**Geological setting.** The Serpukhovian deposits in the Donets Basin are represented by the Samara Formation and most of the Kalmius Formation (stratigraphic interval bounded by the D<sub>1</sub> and D<sub>5</sub><sup>8Lower</sup> limestone beds) (see Fig. 1C), but it is impossible to determine which formation the studied material comes from.

The Samara Formation is composed of a paralic succession of mudstones, cross-bedded siltstones, and fine-grained sandstones. Coarse-grained sandstones and conglomerates are rare. The formation contains 30 to 75 coal beds and up to 10 thin beds of argillaceous, often sandy or crinoidal limestones. Fossils are few and represented by foraminiferans, bryozoans, brachiopods, and bivalves. The thickness of the formation varies from 390 m in the western part of the Donets Basin to 530 m in the area of the city of Donetsk (central part of the basin). The formation is of early Serpukhovian age; the conventionally Visean–Serpukhovian boundary in the Donets Basin is located at the base of the C<sub>1</sub> limestone bed, the basal layer of the Samara Formation (Aisenverg et al., 1963; Feofilova, & Levenshtein, 1963; Levenshtein, & Shirokov, 1963; Dunaeva, 1969; Shulga, 1972; Poletaev, & Vdovenko, 2013).

The Kalmius Formation is represented by a paralic succession of sandstones, siltstones, mudstones, coals (7–11 beds), and limestones (up to 35 beds). The characteristic sandstone beds of the Kalmius Formation have their own names (e.g., the Feninian sandstone bed) and are used for local section correlation. The thickness of the formation ranges from 530 to 800 m (Aisenverg et al. 1963; Levenshtein, & Shirokov 1963; Feofilova, & Levenshtein 1963; Dunaeva, 1969; Poletaev, & Vdovenko, 2013). The limestones of the lower part of the formation, in the interval from the D<sub>1</sub> to D<sub>5</sub> limestone bed inclusive, are characterised by the abundance of corals (especially in the D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub>, and D<sub>5</sub> limestone beds). Among the diverse limestones of the upper part of the Kalmius Formation, in the interval D<sub>5</sub> to E<sub>1</sub>, it is worth noting the wide development of oolitic ones (especially

in the group of the D<sub>7</sub> limestone bed) (Feofilova, & Levenshtein, 1963).

The Serpukhovian paralic deposits of the Donets Basin were accumulated mainly in a large alluvial-deltaic plain, which was flooded periodically by warm epicontinental seas (Logvinenko, 1953). Only the central part of the Donets Basin was characterized by a continuous regime of marine sedimentation in the Serpukhovian and Bashkirian (Reznikov, 1993; Dernov, & Poletaev, 2024). This area was located in a humid tropical and/or subtropical climate (Novik, 1952, 1974; Logvinenko, 1953; Fissunenkov, 2000). This palaeobasin, surrounded on the south and west by land on the site of the Ukrainian Shield, was located on the southeastern periphery of Laurussia and freely connected with Palaeotethys and the east and had intermittent connections with basins located to the west.

#### Systematic palaeontology

Phylum Arthropoda Gravenhorst, 1843  
Class Malacostraca Latreille, 1806  
Subclass Phyllocarida Packard, 1879  
Order Achaeostraca Claus, 1888  
Family Ceratiocarididae Salter, 1863  
Genus *Ceratiocaris* M'Coy, 1849

**Type species.** *Ceratiocaris solenoides* M'Coy, 1849; by original designation.

**Diagnosis.** See Collette, & Rudkin (2010: p. 119) and Collette, & Hagadorn (2010: p. 802).

**Stratigraphic range.** Upper Ordovician–Permian.

*Ceratiocaris* sp.

**Material.** One complete valve of the carapace (specimen NMNH-G 8637/87) and one small fragment of a valve (specimen NMNH-G 8637/88).

**Description.** The better-preserved specimen (NMNH-G 8637/87) is represented by a left valve of a supposedly sub-triangular carapace, which has a straight dorsal hinge line with a very slightly concave wide rostral notch. Anterior and ventral

margins are broadly rounded, postero-lateral angles are blunt, posterior margin is straight, extends obliquely (at an angle close to 50°) to the axis of symmetry of the carapace. A narrow border, which gradually thickens (from 0.3 mm to 0.7 mm) from the posterior to the anterior margin, is present along the ventral margin of the valve. Valve surface is smooth (Fig. 2B). The valve is 20 mm in length and 10 mm in maximum width (the length to width ratio is 2.0).

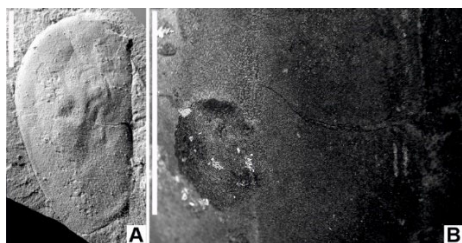


Fig. 2. *Ceratiocaris* sp. from the Serpukhovian of the Donets Basin, specimen NMNH-G 8637/87

A – general view of the valve,  
B – enlarged part of the valve. Scale bars=5 mm

**Remarks.** *Ceratiocaris* sp. is morphologically very similar to *Ceratiocaris truncatus* Woodward, 1871 in terms of the outline of the valve. However, there are some differences, namely: (1) the described valve is somewhat wider compared to the specimen of *Ceratiocaris truncatus*, figured by Jones, & Woodward (1888, pl. 10, fig. 10); (2) the line of the maximum width of the valve in the specimen NMNH-G 8637/87 is located between the valve centre and the valve anterior part, while in *Ceratiocaris truncatus* the ventral and anterior margins form a semi-elliptical line. The posterior margin of the specimen NMNH-G 8637/87 is wider and more concave than that of *Ceratiocaris truncatus*, while the rostral notch is narrower and shallower.

*Ceratiocaris* sp. differs from the other Carboniferous species, *Ceratiocaris oregonensis* Woodward, 1871, in the outline of the valve: in *C. oregonensis* it gradually narrows anteriorly, while in *C. sp.* described above it widens rapidly to about 33 % of the valve length and then sharply narrows. In addition, the posterior margin in *Ceratiocaris oregonensis* is much more concave and narrower.

**Distribution.** *Ceratiocaris* M'Coy, 1849 occurs in the Upper Ordovician–Permian of Europe and North America.

| System        | Subsystem     | Stage        | Lithostratigraphic unit  | Taxa | Some phyllocarids |
|---------------|---------------|--------------|--------------------------|------|-------------------|
| CARBONIFEROUS | PENNSYLVANIAN | Gzhelian     | Araukarytova Formation   |      |                   |
|               |               |              | Avilovka Formation       |      |                   |
|               |               | Kasimovian   | Isayivka Formation       |      |                   |
|               |               |              | Gorlivka Formation       |      |                   |
|               |               | Moscovian    | Almazna Formation        |      |                   |
|               |               |              | Kamenskaya Formation     |      |                   |
|               |               |              | Belaya Kalitva Formation |      |                   |
|               |               | Bashkirian   | Smolyanyivka Formation   |      |                   |
|               |               |              | Mospyne Formation        |      |                   |
|               |               |              | Mandrykyne Formation     |      |                   |
|               |               |              | Amvrosiyivka Formation   |      |                   |
|               | MISSISSIPPIAN | Serpukhovian | Kalmius Formation        |      |                   |
|               |               |              | Samara Formation         |      |                   |
|               |               | Visean       | Mezhova Formation        |      |                   |
|               |               | Tournaian    | Mokra Volnovakha Group   |      |                   |

Fig. 3. Stratigraphic distribution of the phyllocarid taxa in the Carboniferous of the Donets Basin

A – *Dithyrocaris tricornis aisenbergi* Krestovnikov, 1961 (after Krestovnikov, 1961: pl. 3, fig. 7); B, E – *Dithyrocaris colei* Portlock, 1843 (after Krestovnikov, 1961: pl. 3, fig. 6 (Fig. 3B) and the specimen GM LNU-45/02 in the Geological Museum of the Luhansk Taras Shevchenko National University, Poltava (Fig. 3E)); C – *Dithyrocaris tenuistriata* M'Coy, 1844 (after Krestovnikov, 1961: pl. 3, fig. 5); D – *Dithyrocaris cf. granulata* Woodward & Etheridge, 1873 (specimen IGS NASU-41/01 in the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv); F – Phyllocarida indet. (after Dernov and Poletaev, 2024: Fig. 6I). Abbreviation: D. – *Dithyrocaris*



## Discussion and conclusions

In the Carboniferous succession of the Donets Basin, phyllocarids are predominantly distributed in the Bashkirian interval, where *Dithyrocaris tenuistriata* M'Coy, 1844 (Krestovnikov, 1961), *D. colei* Portlock, 1843 (Krestovnikov, 1961 and author's unpublished data), *D. cf. granulata* Woodward, & Etheridge, 1873 (author's unpublished data), and Phyllocarida indet. (Dernov, 2023; Dernov, & Poletaev, 2024) recorded (Fig. 3). Only three taxa, *Dithyrocaris granulata doneziana* Riabin, 1921 and *Ceratiocaris* sp., as well as *Dithyrocaris tricornis aisenvergi* Krestovnikov, 1961, occur from outside the Bashkirian interval, namely the Serpukhovian and Upper Pennsylvanian, respectively (Riabin, 1921; Krestovnikov, 1961; this study). Thus, Carboniferous phyllocarids of the Donets Basin are represented by only two genera, *Dithyrocaris* Scouler in Portlock, 1843 and *Ceratiocaris* M'Coy, 1849.

All records of phyllocarids in the Carboniferous of the Donets Basin are confined to black shales formed in dysaerobic marine conditions (Krestovnikov, 1961; Dernov, & Poletaev, 2024; this study). The palaeoenvironmental context of occurrence of *Dithyrocaris granulata doneziana* Riabin, 1921 is somewhat unclear. The D<sub>1</sub> limestone bed in the Kalmius Formation (the D<sub>1</sub><sup>5</sup> limestone bed in the modern Carboniferous lithostratigraphic scheme of the Donets Basin) from which this subspecies originated, contains rich marine biota consisting of calcareous algae, foraminifers, corals, bryozoans, brachiopods, bivalves, gastropods, cephalopods, crinoids, echinoids etc., and forming a small bioherm (Aisenverg et al. 1987; Poletaev et al. 1988). It is possible that *Dithyrocaris granulata doneziana* comes from the shale bed separating the limestone beds of the D<sub>1</sub> limestone group consisting of five beds, from the D<sub>1</sub> bed to the D<sub>1</sub><sup>5</sup> bed (Poletaev, & Vdovenko, 2013).

**Acknowledgments, sources of funding.** I would like to thank Dr Markus Poschmann (General Direction for Cultural Heritage of Rhineland-Palatinate, Mainz) for help with rare literature. I also sincerely grateful to Dr Viktor V. Ohar (ESI "Institute of Geology", Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv) whose comments and suggestions improved the quality of the final version of the manuscript.

The research was supported within the framework of the programme "Late Precambrian and Phanerozoic biota of Ukraine: biodiversity, revision of systematic composition and phylogeny of leading groups".

## References

- Aisenverg, D. Ye., Brazhnikova, N. Ye., Novik, Ye. O., Rotai, A. P., & Shulga, P. L. (1963). *Carboniferous stratigraphy of the Donets Basin*. Publishing of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR [in Russian]. [Айзенверг, Д. Е., Бражникова, Н. Е., Новик, Е. О., Ротай, А. П., & Шульга, П. Л. (1963). *Стратиграфия каменноугольных отложений Донецкого бассейна*. Издательство АН УССР].
- Briggs, D. E. G., Rolfe, W. D. I., Butler, P. D., Liston, J. J., & Ingham, J. K. (2011). Phyllocarid crustaceans from the Upper Devonian Gogo Formation, Western Australia. *Journal of Systematic Palaeontology*, 9(3), 399–424. <https://doi.org/10.1080/14772019.2010.493050>
- Claus, C. (1888). Über den Organismus der Nebaliden und die systematische Stellung der Leptostraken. *Arbeiten aus dem zoologischen Institut der Universität Wien und der zoologischen Station in Triest*, 8, 1–148.
- Collette, J. H., & Hagadorn, L. W. (2010). Early evolution of phyllocarid arthropods: phylogeny and systematics of Cambrian-Devonian archaestracons. *Journal of Paleontology*, 84(5), 795–820. <https://doi.org/10.1666/09-092.1>
- Collette, J. H., & Rudkin, D. M. (2010). Phyllocarid crustaceans from the Silurian Eramosa Lagerstätte (Ontario, Canada): taxonomy and functional morphology. *Journal of Paleontology*, 84(1), 118–127. <https://doi.org/10.1666/08-174.1>
- Dernov, V. (2023). *Hankoichnus* ichnogen. nov., a new arthropod (?) trace fossil from the Carboniferous of the Donets Basin (Ukraine). *Geological Journal (Ukraine)*, 382, 53–58. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.1.265486>

- Dernov, V. S., & Poletaev, V. I. (2024). New geological and palaeontological data of the Dyakove Group (Carboniferous) and age-related rock formations of the central Donets Basin, Ukraine. *Geological Journal (Ukraine)*, 386, 3–21. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2024.1.285644>
- Dunaeva, N. M. (1969). Open Donets Basin. In: V. G. Bondarchuk (Ed.), *Stratigraphy of the Ukrainian SSR. Volume 5. Carboniferous* (pp. 21–48). Naukova Dumka [in Ukrainian]. [Дунаева, Н. М. (1969). Відкритий Донбас. В. Г. Бондарчук (ред.), *Стратиграфія УРСР. Том V. Карбон* (с. 21–48). Наукова думка].
- Feofilova, A. P., & Levenshtein, M. L. (1963). *Features of the sedimentation and coal accumulation in the Early and middle Carboniferous of the Donets Basin*. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR [in Russian]. [Феофилова, А. П., & Левенштейн, М. Л. (1963). *Особенности осадко- и угленакпления в нижнем и среднем карбоне Донецкого бассейна*. Издательство АН СССР].
- Fissunencko, O. P. (2000). *On the problem of the Moscovian Stage*. Publishing House of the Luhansk University [in Russian]. Фисуненко, О. П. (2000). *К проблеме московского яруса*. Издательство Луганского университета].
- Gravenhorst, J. L. C. (1843). *Vergleichende Zoologie. Graß, Barth & Comp.* <https://doi.org/10.5962/bhl.title.58729>
- Jones, T. R., & Woodward, H. (1888). A monograph of the British Palaeozoic Phyllopoda (Phyllocarida, Packard). Part I. Ceratiocaridæ. *Monographs of the Palaeontographical Society*, 41, 1–72. <https://doi.org/10.1080/02693445.1888.12027998>
- Krestovnikov, V. N. (1961). New phyllocarid crustaceans from the Palaeozoic of the Russian plate, the Urals, Timan, and Donets Basin. *Transactions of the Geological Institute*, 52, 1–67 [in Russian]. [Крестовников, В. Н. (1961). Новые ракообразные филлокариды палеозоя Русской платформы, Урала, Тимана и Донбасса. *Труды Геологического института*. 52, 1–67].
- Latreille, P. A. (1806). *Genera Crustaceorum et Insectorum secundum ordinem naturalem in familias disposita, iconibus exemplaribus plurimis explicata*. Paris & Argentorati. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.34916>
- Levenshtein, M. L., & Shirokov, A. Z. (1963). Lower Carboniferous. In I. A. Kuznetsov (Ed.), *Geology of coal and oil shale deposits of the USSR. Volume 1. Coal basins and deposits in the south part of the European part of the USSR* (pp. 164–174). State scientific and technical publishing house of literature on geology and subsoil protection [in Russian]. [Левенштейн, М. Л., & Широков, А. З. (1963). Нижний карбон. Кузнецов И. А. (Ред.), *Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Том 1. Угольные бассейны и месторождения юга европейской части СССР*. Гос. НТИ литературы по геологии и охране недр].
- Liu, Y., Poschmann, M. J., Fan, R., Zong, R., & Gong, Y. (2023) Silurian phyllocarid crustaceans (Phyllocarida, Archaestraconia) from South China. *Journal of Systematic Palaeontology*, 21(1), article 2187718. <https://doi.org/10.1080/14772019.2023.2187718>
- Logvinenko, N. V. (1953). *Lithology and palaeogeography of the Carboniferous coal-bearing deposits of the Donets Basin*. Publishing House of the Kharkiv University [in Russian]. [Логвиненко, Н. В. (1953). *Литология и палеогеография продуктивной толщи донецкого карбона*. Издательство ХГУ].
- M'Coy, F. (1844). A synopsis of the characters of the Carboniferous limestone fossils of Ireland. Williams & Norgate. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.11559>
- M'Coy, F. (1849). On the classification of some British fossil Crustacea, with notices of new forms in the University of Cambridge. *The Annals and Magazine of Natural History*, 2(4), 412–414. <https://doi.org/10.1080/03745486009494843>
- Novik, Ye. O. (1952). *Carboniferous flora of the European part of the USSR*. Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR [in Russian]. [Новик, Е. О. (1952). *Каменноугольная флора Европейской части СССР*. Издательство АН СССР].
- Novik, Ye. O. (1974). *Regularities of development of the Carboniferous flora of the south of the European part of the USSR*. Naukova Dumka [in Russian]. [Новик, Е. О. (1974). *Закономерности развития каменноугольной флоры юга Европейской части СССР*. Наукова думка].
- Packard, A. S. Jr (1879). The nebalid Crustacea as types of a new order. *American Naturalist*, 13, 128. <https://doi.org/10.1080/00222937908562419>
- Poletaev, V. I., & Vdovenko, M. V. (2013). Lower Carboniferous (Mississippian). In P. F. Gozhik (Ed.), *Stratigraphy of the Upper Proterozoic and Phanerozoic of Ukraine. Volume 1. Stratigraphy of the Upper Proterozoic, Palaeozoic and Mesozoic* (pp. 250–283). LAT&K [in Ukrainian]. [Поletaев, В. І., & Вдовенко, М. В. (2013). Нижній карбон (міссісипій). П. Ф. Гожик (Ред.), *Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою України* (с. 250–283). LAT&K].
- Portlock, J. E. (1843). *Report on the geology of the county of Londonderry, and of parts of Tyrone and Fermanagh*. Longman, Brown, Green and Longmans. De Gruyter. <https://doi.org/10.1519/9783112391341-021>
- Reznikov, A. I. (1993). The Dyakove Group and its stratigraphic position in the Carboniferous succession of the Donets Basin. *Geological Journal (Ukraine)*, 262, 52–57 [in Russian]. [Резников, А. И. (1993). Дьяковская серия и ее положение в стратиграфической схеме карбона Донбасса. *Геологический журнал*. 262, 52–57].
- Riabinin, A. N. (1921). Notes on some fossil Phyllocarida. *Yearbook of the Russian Palaeontological Society*, 3, 23–33 [in Russian]. [Рябинин, А. Н.

(1921). Заметка о некоторых ископаемых Phyllocarida. *Ежегодник Русского палеонтологического общества*, 3, 23–33].

Rode, A. L., & Lieberman, B. S. (2002). Phylogenetic and biogeographic analysis of Devonian phyllocarid crustaceans. *Journal of Paleontology*, 76(2), 271–286. <https://doi.org/10.1017/s0022336000041706>

Rolfe, W. D. I. (1969). Phyllocarida. In R. C. Moore (Ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology. Part R, Arthropoda* 4(1) (pp. 296–331). Geological Society of America and University of Kansas Press.

Salter, J. W. (1863). Note on the Skiddaw Slate fossils. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 19, 135–140.

Shulga, V. F. (1972). Regularities of changes in coal-bearing and cyclicity in the Samara Formation of the western Donets Basin. *Lithology and Mineral*

*Resources*, 5, 51–66 [in Russian]. [Шульга, В. Ф. (1972). Закономерности изменения угленосности и цикличности в самарской свите Западного Донбасса. *Литоология и полезные ископаемые*, 5, 51–66].

Woodward, H. (1871). On some new phyllopodous crustaceans from Palaeozoic rocks. *Geological Magazine*, 8, 104. <https://doi.org/10.1017/s0016756800161205>

Woodward, H., & Etheridge, R. (1873). *Explanation of sheet 23. Memoirs of the Geologic Survey, Scotland*, 1–99.

Отримано редакцією журналу / Received: 13.03.25

Прорецензовано / Revised: 27.03.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Віталій ДЕРНОВ, д-р філософії з природничих наук

ORCID ID: 0000-0002-5873-394X

e-mail: vitalydernov@gmail.com

Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,

Національний науково-природничий музей НАН України, Київ, Україна

## НОВА ЗНАХІДКА ФІЛОКАРИДИ (CRUSTACEA: PHYLLOCARIDA) В СЕРПУХОВСЬКИХ ВІДКЛАДАХ (МІССІСІПІЙ) ДОНЕЦЬКОГО БАСЕЙНУ (УКРАЇНА)

**Вступ.** Кам'яновугільні філокариди Донецького басейну недостатньо вивчені і до останнього часу були представлені родом *Dithyrocaris* та невизначеними рештками, віднесеними до *Phyllocarida* indet. Вивчення викопних філокарід має велике палеобіогеографічне значення, принаймні для кам'яновугільних морських палеобасейнів північної півкулі.

**Методи.** Розглянуто два зразки стулок панцира філокарід *Ceratiocaris* sp. Скам'янілості походять з відкладів серпуховського ярусу західної частини Донбасу. Серпуховські відклади на Донбасі представлені самарською світою та більшою частиною кальміуської світи, але неможливо визначити, з якої саме світи походить досліджений матеріал.

**Результати.** Описаний *Ceratiocaris* sp. за обрисами стулки дуже схожий на *Ceratiocaris truncatus* Woodward, 1871. Проте є деякі відмінності, а саме: описана стулка дещо ширша порівняно з *Ceratiocaris truncatus*, лінія найбільшої ширини дослідженої стулки розташована між її центром і передньою частиною, тоді як у *Ceratiocaris truncatus* вентральний і передній краї утворюють напівеліптичну лінію. Задній край у *Ceratiocaris* sp. ширший і більш увігнутий, ніж у *Ceratiocaris truncatus*, тоді як ростральна виїмка вужча і дрібніша. *Ceratiocaris* sp. відрізняється від *Ceratiocaris oretonensis* Woodward, 1871 обрисами стулки: у *C. oretonensis* вона поступово звужується до переднього краю, тоді як у *C. sp.* вона швидко розширюється приблизно до 33 % довжини стулки, а потім різко звужується. Крім того, задній край *Ceratiocaris oretonensis* набагато більш увігнутий і вужчий.

**Висновки.** У кам'яновугільних відкладах Донецького басейну філокариди поширені переважно у відкладах башкирського ярусу. Лише два таксони, *Dithyrocaris granulata doneziana* Riabin, 1921 та *D. tricornis aisenvergi* Krestovnikov, 1961, походять з-поза меж башкирського інтервалу, а саме із серпуховського ярусу та верхнього пенсильванію, відповідно. Отже, на сьогодні кам'яновугільні філокариди Донбасу представлені лише двома родами: *Dithyrocaris* Scouler in Portlock, 1843 та *Ceratiocaris* McCoy, 1849.

**Ключові слова:** *Phyllocarida*, міссісіпій, серпуховський ярус, Донецький басейн, Україна.

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

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

УДК 551.781.5:553.98(477.7)  
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.02>

Володимир ГНІДЕЦЬ<sup>1</sup>, канд. геол. наук  
ORCID ID: 0009-0001-6372-7878  
e-mail: vgnidets53@gmail.com

Костянтин ГРИГОРЧУК<sup>1</sup>, д-р геол. наук  
ORCID ID: 0000-0003-1595-0968  
e-mail: kosagri@ukr.net

Анастасія РЕВЕР<sup>1</sup>, інж. I кат.  
ORCID ID: 0009-0001-5989-4542

Оксана КОХАН<sup>1</sup>, канд. геол. наук  
ORCID ID: 0009-0009-1075-9591  
e-mail: kohanom8@gmail.com

<sup>1</sup>Інститут геології і геохімії горючих копалин НАН України, Львів, Україна

## ЛІТОЛОГІЧНА БУДОВА ТА ФАЦІАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ КЕРЛЕУТСЬКИХ ВІДКЛАДІВ ПРИЧОРНОМОРСЬКОГО МЕГАПРОГІНУ

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

**Вступ.** У складі майкопського осадового комплексу Причорноморського мегапрогину відклади середнього майкопу є найбільш цікавими в економічному аспекті, що доведено відкриттям низки родовищ нафти та газу. Середньомайкопські відклади у складі нижнього та верхнього підгоризонтів керлеутського регіонарусу зазвичай залягають на нижньомайкопських, а перекриваються без видимої перерви верхньомайкопськими. Повнота їх розрізу характеризується значними просторовими варіаціями. Максимальні товщини (понад 2000 м) спостерігаються на теренах Керченського півострова та в південно-східних районах Рівнинного Криму (1800 і більше метрів). Натомість на півночі Рівнинного Криму у Присиваші та Північному Причорномор'ї розкрито скорочені розрізи, товщина яких коливається від 200–300 м до 400–500 м. У межах акваторії північно-західного шельфу Чорного моря вона не перевищує 650 м. У тектонічному відношенні Причорноморський мегапрогин складається з кількох кулісоподібно зчленованих від'ємних структурних елементів більш високого порядку: Каркінітсько-Північнокримський, Індоло-Кубанський та Південнокерченський прогини. Метою роботи є встановлення особливостей літологічної та літмологічної структури середньомайкопської (керлеутської) товщі Причорноморського мегапрогину, вивчення структурно-текстурних та мінералого-петрографічних особливостей порід у контексті реконструкції умов їх осадоагромадження.

**Методи.** Літологічне розчленування розрізів свердловин проведено шляхом інтерпретації результатів ГДС (радіоактивні методи). Особливості розвитку осадових тіл різного складу з'ясовано на основі виділення літмітів згідно з методикою (Карогодин, 1980). Даний підхід апробовано при вивченні майкопських нашарувань Північнокримського та Індоло-Кубанського прогинів (Гнідець та ін., 2023). В роботі застосовано розбивки, розроблені та прийняті для використання геологами КП "Південьгеоцентр". Петрографічні дослідження (понад 400 шліфів порід, колекція відділу седиментології провінцій горючих копалин ІГТГК НАН України) виконані авторами під поляризаційним мікроскопом Carl Zeiss Jena.

**Результати.** З'ясовано просторово-вікові особливості літолого-літмологічної будови керлеутської товщі майкопу Причорноморського мегапрогину. Виділено чотири літологічні комплекси: піщано-алевролітовий (кластогенів понад 60 %); алевролітовий (50–60 %); аргіліто-алевролітовий (40–60 %) та аргілітовий (менше 40 %), які характеризуються закономірністю заміщення від крайових частин до депоцентрів депресій. Розрізи середньомайкопської товщі складені 20–84 літмітами регіонального, зонального та локального поширення, завтовшки 20–200 м, алевролітового (23 %), змішаного (22 %) та глинистого (55 %) полів. Виокремлено кілька рівнів розвитку різнорангових алевроліто-піщаних пачок ( $K_1-K_2-K_3-K_4$ ), встановлено особливості їх просторового поширення. Виявлено специфіку літмологічної будови відкладів Причорноморсько-Кримського (товщина літологічних тіл до 100 м) та Азово-Чорноморського (товщина тіл не більше 40 м) осадово-порідних басейнів.

**Висновки.** Встановлені особливості просторово-вікової мінливості літолого-літмологічної структури середньомайкопської товщі слугуватимуть основою створення моделі умов їх седиментації в межах Кримського сегменту східного Паратетису, сприятиме розумінню характеру просторово-вікового поширення порід-колекторів та флюїдотривів, визначенню основних напрямків геологорозвідувальних робіт у регіоні.

**Ключові слова.** Паратетис, Причорноморський мегапрогин, середній майкоп, керлеутський горизонт, літогенез.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У складі майкопського осадового комплексу Причорноморського мегапрогину відклади середнього майкопу є найбільш цікавими в економічному аспекті (Михайлов та ін., 2021). Їх перспективність доведена відкриттям понад десяти родовищ нафти та газу (Іванюта, 1998) як у межах північно-західного шельфу Чорного моря (Голицинське, Південноголицинське, Шмідта, Архангельське, Кримське), так і на теренах Рівнинного Криму та Керченського півострова (Стрілкове, Південносиваське, Владиславівське, Куйбишівське, Мошкарівське, Балочне). Поклади приурочені до верхньої частини верхньокерлеутського підгоризонту і пов'язані з піщано-алевролітовими пачками потужністю 3–20 м. З'ясування літологічної будови товщі та просторово-вікових особливостей поширення кластогенних горизонтів стане підґрунтям для здійснення різнорангових

седиментаційних реконструкцій, що становитиме інтерес як у теоретичному, так і практичному плані.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Геологія майкопських відкладів Причорноморського мегапрогину вивчена вкрай нерівномірно. Найдетальніше вона досліджена на теренах Рівнинного Криму, Північного та Західного Причорномор'я, Керченського півострова. Найменше – в межах акваторій Чорного та Азовського морів. У виробничих і науково-виробничих звітах (Апостолова і др., 1982; Бондаренко і др., 1978; Полухтович та ін., 1994; Лукін та ін. 2008) були розглянуті питання літології та стратиграфії майкопських відкладів по окремих свердловинах та розвідувальних площах. В узагальнювальних роботах (Плахотный і др., 1971; Цихоцька та ін. 1986; Окуловский, 1987; Карпенко та ін. 2005; Стовба та ін., 2005; Гожик та ін. 2006; Скляр та ін. 2007; Ключина, 2009; Науменко та ін. 2010; Лазарук, 2010; Вижва



та ін., 2017; Вернигорова, Рябоконь, 2018; Михайлов та ін., 2021; Гнідець та ін. 2023) схарактеризовані характер поширення майкопських відкладів, їх мінералого-петрографічні особливості, деякі аспекти літофаціальної зональності та обстановок осадо-нагромадження окремих структурних зон регіону, локалізовані перспективні в нафтогазопозуковому відношенні ділянки.

**Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми.** У дослідженнях попередніх років було розглянуто низку питань з геології відкладів майкопу загалом. Зокрема, це стосувалося характеру їх поширення, літолого-фаціальних особливостей, умов осадо-нагромадження, деяких аспектів розвитку осадових тіл – потенційних природних колекторів. Детальне ж вивчення літологічної будови найперспективніших утворень середнього майкопу, передусім Індоло-Кубанського прогину, практично не проводилося, за винятком роботи (Науменко та ін., 2010). Власне ця проблема і розглядається у даному дослідженні.

**Формулювання цілей статті.** Мета статті – визначення характеру поширення по латералі та в розрізі середньомайкопських відкладів осадових тіл різного складу в контексті відтворення у подальшому умов їх осадо-нагромадження.

**Загальна геологічна характеристика.** Середньомайкопські відклади у складі нижнього та верхнього підгоризонтів керлеутського регіорусу зазвичай згідно залягають на нижньомайкопських утвореннях, а перекриваються без видимої перерви верхньомайкопськими.

Від нижчезалеглих керлеутські відклади відрізняються меншою карбонатністю. Для них характерне зростання вмісту біогенних решток від нижнього до верхнього підгоризонтів. У першому випадку спостерігаються тільки фрагменти риб, радіоларії, спікули губок, а в другому – крім того, фіксуються численні черепашки форамініфер (Астахов та ін., 1984, Гожик та ін., 2006, Вернигорова, Рябоконь, 2018).

Повнота розрізу середньомайкопських відкладів характеризується значними просторовими варіаціями (Аленкин та ін., 1985, Зосимович, Шевченко, 2015). Максимальні потужності (понад 2000 м) спостерігаються на теренах Керченського півострова та в південно-східних районах Рівнинного Криму (1800 і більше метрів) (рис. 1). Натомість на півночі Рівнинного Криму у Присивашші та Північному Причорномор'ї розкрито скорочені розрізи, товщина яких коливається від 200–300 до 400–500 м. У межах акваторії північно-західного шельфу Чорного моря вона не перевищує 650 м (Гнідець та ін., 2023).

Нагромадження відкладів середнього майкопу відбувалося в басейні, розташованому в межах Кримсько-Кавказького сегменту Паратетису. Останній, згідно з палеогеографічними реконструкціями (Зоненшайн та ін., 1987, Dercourt et al, 2000; Балуховський та ін., 1998) в олігоцені час охоплював західну частину обширної Скільської епіпелагіалі, що межувала з Фено-Сарматським (Донецьким, північ) та Молдовським (захід) суходолами, а на півдні вона була облямована Добрудзько-Кримсько-Кавказькою зоною підняття (див. рис. 1).

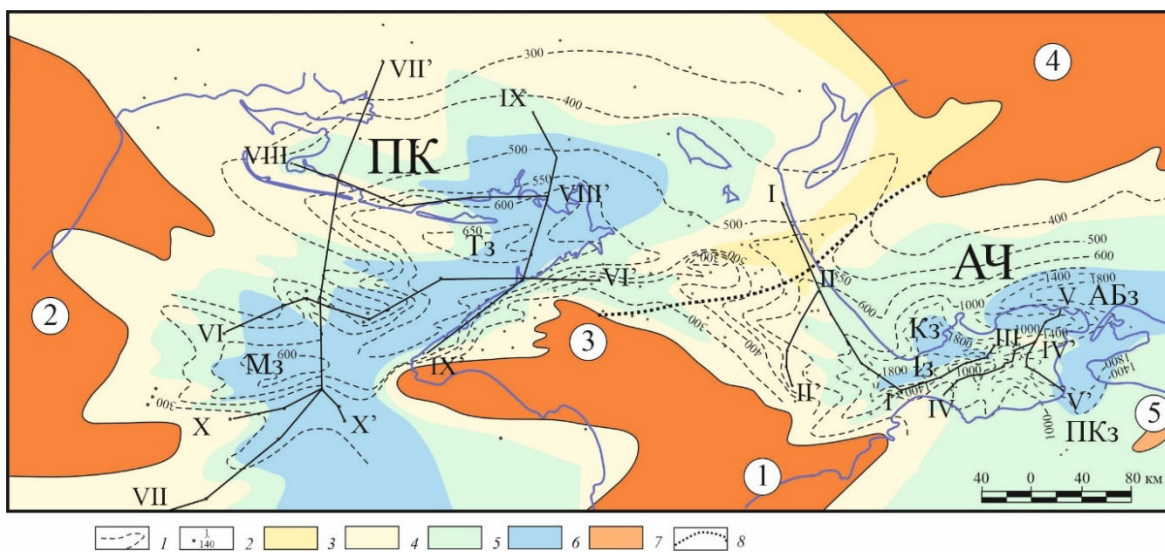


Рис. 1 Літолого-фаціальна схема середньомайкопських відкладів Причорноморського мегапрогину та положення літологічних профілів:

- 1 – ізопакіти, 2 – свердловина та сумарна товщина прошарків пісковиків та алевролітів.  
 Літологічні комплекси: 3 – піщано-алевролітовий (кластогенів понад 60 %); 4 – алевролітовий (кластогенів 50–60 %);  
 5 – аргіліто-алевролітовий (кластогенів 40–50 %), 6 – аргілітовий (кластогенів менше 40 %). 7 – відсутність відкладів.  
 8 – межа осадово-породних басейнів. Осадово-породні басейни: ПК – Причорноморсько-Кримський;  
 АЧ – Азово-Чорноморський. Западини: МЗ – Михайлівська, ТЗ – Таврійська, КЗ – Казантипська,  
 АБЗ – Азово-Багерівська, ПКЗ – Південнокерченська. Підняття (в колі): 1 – Гірськокримське, 2 – Молдовське, 3 – Центральнокримське,  
 4 – Донецьке, 5 – Кавказьке. Профілі: I–I'; II–II'; III–III'; IV–IV'; V–V'; VI–VI'; VII–VII'; VIII–VIII'; IX–IX'; X–X'.

У тектонічному відношенні Причорноморський мегапрогин складається з кількох кулісоподібно зчленованих від'ємних структурних елементів більш високого порядку (Герасимов та ін., 2006): Каркінитсько-Північнокримський, Індоло-Кубанський та Південнокерченський прогини (див. рис. 1). Останні різняться між собою за товщинами утворень середнього майкопу, що дало підстави нам виокремити два осадово-породні басейни: Причорноморсько-

Кримський, що охоплює Каркінитсько-Північнокримський прогин та Українську монокліналь і Азово-Чорноморський, що охоплює Індоло-Кубанський та Південнокерченський прогини з прилеглими підняттями.

#### Методи

Геологічні матеріали для проведення досліджень зібрані колективом співробітників відділу седиментології ПГК "Інституту геології і геохімії горючих копалин

НАН України" (ІГГГК НАН України) в ході польових робіт, проведених в 2000–2013 рр., на виконання наукових держбюджетних тем НАН України та договірних з НАК "Нафтогаз України". Літологічне розчленування розрізів свердловин проведено шляхом інтерпретації результатів ГДС (радіоактивні методи). Особливості розвитку осадових тіл різного складу з'ясовано на основі виділення літмітів згідно з методикою (Карогадин, 1980). Даний підхід апробований при вивченні майкопських нашарувань Північнокримського та Індоло-Кубанського прогинів (Гнідець та ін., 2023). В роботі застосовано розбивки, розроблені та прийняті для використання геологами КП "Південькогеоцентр". Петрографічні дослідження (понад 400 шліфів порід, колекція відділу седиментології провінції горючих копалин ІГГГК НАН України) виконали автори під поляризаційним мікроскопом Carl Zeiss Jena.

### Результати

**Особливості поширення та літофації середньомайкопських відкладів.** За характером просторового розподілу товщин середньомайкопських відкладів в Азово-Чорноморському осадово-породному басейні виокремлюється низка депресій (Азово-Багерівсько-Південнокерченська, Індольська, Казантипська) та підняття (Краснокутсько-Багерівське, Мошкарівсько-Фонтанівсько-Горностаївське). Значний за площею розвитку Азово-Багерівсько-Південнокерченський депоцентр керлеутського седиментаційного басейну, з ізопахітами понад 2000 м, охоплює центральні ділянки Індоло-Кубанського та Південнокерченського прогину (див. рис. 1) і являє собою субширотну морфоструктуру "лапатої" форми з пологим північним та більш крутим південним бортами. Із заходу, сходу та півночі він обмежений підняттями: Гірськокримським, Кавказьким (Анапським), Багерівським та Центральноазовським, а на півдні – зчленовується з трогом Сорокіна. У центральних районах басейну між Краснокутським та Фонтанівсько-Горностаївським підняттями локалізований значно менший за площею, але подібний за товщинами середньомайкопських відкладів (понад 1800 м) Казантипський депоцентр, який на заході сполучається з Індольським. Обидві структури характеризуються субширотним простяганням, пологіми північними та більш крутими південними бортами. Локалізовані в межах басейну підняття (Краснокутське, Багерівське та Мошкарівсько-Фонтанівсько-Горностаївське) обмежені ізопахітами 900–1000 м. У морфологічному відношенні це субширотно видовжені асиметричні структури з крутими північними та пологими південними схилами. Вони розмежовані вузькими сідловинами, що оконтурені ізопахітою 900 м.

У Причорноморсько-Кримському осадово-породному басейні локалізовані два практично ізометричні субширотного простягання депоцентри – Михайлівський (південний) та Таврійський (північний) з товщинами понад 650 м, що субмеридіональною депресійною зоною з'єднані між собою (див. рис. 1). У Західному та Північному Причорномор'ї, Рівнинному Криму, на Крайовому уступі розріз керлеуту скорочений (25–300 м).

Літологічний склад середньомайкопської товщі в обох басейнах однаковий і характеризується домінуванням глинистих літотипів (50–75 % розрізу), що різняться за вмістом алевро-псамітової складової. Пласти кластичних різновидів (пісковики 0–10 %, алевроліти 31–59 %), завтовшки 0,05–30 м, характеризуються нерівномірним просторово-віковим поширенням, і концентруються переважно у верхній частині верхньокерлеутського підгоризонту. У депресійних зонах спостерігається підвищений вміст глинистих відмін (понад 70 %).

Збільшені товщини пластів пісковиків (до 10–30 м) простежуються в розрізах, локалізованих у північних та східних районах Рівнинного Криму та Північного Причорномор'я. Їхня роль зростає при наближенні до ймовірних джерел зносу уламкового матеріалу або в межах певних структурно-морфологічних форм басейну (схили та склепінні зони підняття).

Усереднений склад середньомайкопської товщі Причорноморсько-Кримського осадово-породного басейну такий: вміст пісковиків у розрізі коливається від 0 до 26 % (середній 4 %), алевролітів – від 27 до 59 % (43 %), аргілітів – від 28 до 75 % (53 %), а Азово-Чорноморського – пісковиків від 0 до 11 % (середній 3 %), алевролітів – від 25 до 59 % (42 %), аргілітів – від 36 до 72 % (55 %). Дані значення підтверджують висновок про літологічну подібність середньомайкопської товщі обох басейнів.

За сумарним вмістом кластогенних порід виокремлюються чотири літологічні комплекси: *піщано-алевролітовий*; *алевролітовий*; *аргіліто-алевролітовий* та *аргілітовий* (див. рис. 1), які у такій послідовності зміщують один одного в напрямку від периферії до центральних частин депресійних зон.

**Піщано-алевролітовий комплекс** – піщано-алевролітових відмін понад 60 % розрізу, локалізований у північно-східних районах регіону і формує вузьке тіло (завтовшки до 500 м) з язикоподібними відгалуженнями, що облямовує Донецький суходіл. Південніше дані утворення поступово заміщуються *алевролітовим комплексом* (50–60 %), що локалізований в західній частині регіону і формує поле субмеридіонального простягання завтовшки від кількох метрів до 500 м. Останній, у свою чергу, заміщується відкладами *аргіліто-алевролітового* (40–50 %), а депресійні зони охоплює *аргілітовий комплекс з прошарками алевролітів* (30–40 %), товщина якого досягає 2000 м.

### Мінералого-петрографічна характеристика.

Фактичним (керновим) матеріалом найбільш повно охарактеризовані відклади середнього майкопу східних районів Рівнинного Криму (Стрілкова, Індольська, Джанкойська та ін. площі) та західних – Керченського півострова (Півд. Сиваська, Андріївська, Красноармійська, Владиславівська площі), дещо слабше північно-західного шельфу Чорного моря (площа Голицина, Шмідта, Архангельського та ін.). Натомість у межах центральної частини Керченського півострова дані утворення вивчені фрагментарно, що зумовлено точковим (незначним) відбором кернавого матеріалу.

**Аргіліти** (глини) світло- та темно-сірі із зеленкуватим відтінком, невапнисті, нерівномірно піскувато-алевритисті, щільні, неясно- та лінзоподібношаруватої текстури (рис. 2, 3).

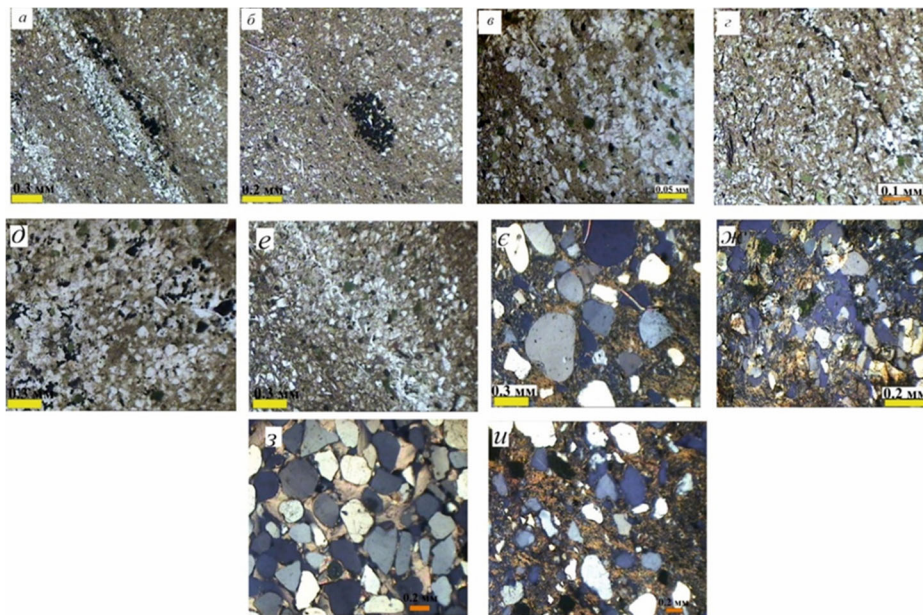
Основна маса порід хлорит-гідрослюдистого складу зі слабовираженою орієнтованою текстурою, з лінзами, скупченнями, гніздами та міліметровими прошарками алевриту, локально з коричнево-бурими конкреціями сидериту (1–2 см). Відмічено рівномірно розсіяний вуглефікований рослинний детрит, фрагменти мікрофауни (форамініфери) поганої збереженості.

Уламковий матеріал (5–30 %) псаммо-алевритової розмірності розподілений укрив нерівномірно, представлений обкатаними зернами кварцу, рідше табличками польових шпатів (плагіоклаз, мікроклін), лусками мусковіту та хлориту, уламками кременистих і ефузивних порід. Спостерігається доволі багато (до 10 %) світло-зелених стяжін аутигенного глауконіту лапатої форми, розміром 0,12–0,5 мм та зерен піриту, які нерівномірно розсіяні у породах. Пірит в асоціації з окисненими



бітумами часто заліковує пори та мікротріщинки. Зрідка спостерігаються порожнини, виповнені жовтими фосфатами, та поодинокі дрібні зерна сидериту, вміст якого

прошарками зростає до 10–15 %. Акцесорні мінерали представлені зернами епідоту, цоїзиту, циркону, турмаліну, рутилу, гранату та лейкоксену.



**Рис. 2. Структурно-речовинні особливості середньомайкопських порід Причорноморсько-Кримського осадово-порідного басейну (Гнідець та ін., 2023):**

- а, б – аргіліт: лінза алевриту з прожилком піриту (а); стяжіння піриту (б) (св. Голицина-1, інт. 620–625 м, ніколі II);  
в – аргіліт із гніздоподібними (лінзоподібними) скупченнями алевритового матеріалу (до 12 %) (св. Голицина-1, інт. 585–590 м, ніколі X); г – аргіліт алевритистий з фрагментами вуглефікованого рослинного детриту (св. Голицина-25, інт. 704–714 м, ніколі II);  
д, е – алевроліт (із включеннями глауконіту та бітумів) (св. Голицина-1, інт. 590–594 м, ніколі X);  
є, ж – пісковик алевритистий з тонкими мікротріщинами та навколозерновими каналами (св. Голицина-2, інт. 485–494 м, ніколі X);  
з – пісковик із пойкилітовим кальцитовим цементом (св. Таврійська-9, інт. 750–751 м, ніколі X);  
и – аргіліт алеврито-псамітовий (св. Шмідта-25, інт. 654–661 м, ніколі X)

*Алевроліти та пісковики* у більшості формують прошарки завтовшки 0,3–1,0 м серед глинистих нашарувань. Породи сірого, світло-сірого кольору із зеленкуватим відтінком, щільні з лінзоподібношаруватою або шаруватою текстурою, зумовленою нерівномірним розподілом глинистого матеріалу, переважно дрібнозернисті, олігоміктові з хлорит-гідрослюдистим цементом.

Кластичний матеріал (70–75 %) порівняно добре відсортований. У породах алевритові зерна кутастої та неокатаної форми, а псамітові – кутасто-обкатані, інколи зі звивистими (бухтоподібними) контурами. Він представлений зернами кварцу, у підпорядкованих кількостях присутні таблички польових шпатів, луски мусковіту, рідко спостерігаються уламки кременистих порід. Зерна кварцу переважно безколірні, переважний розмір 0,06–0,16 мм, лише поодинокі – досягають 0,6 мм. Польові шпати представлені плагіоклазами з тонкими двійниками. Ізометричні зерна глауконіту (4–5 %) розподілені в породах рівномірно. Рудні мінерали представлені ільменітом, неправильної форми зернами лейкоксену та піритом, який простежується у вигляді окремих зерен та їхніх скупчень. Цемент (до 25–30 %) гідрослюдистого, іноді карбонатно-гідрослюдистого складу. Тип цементу поровий, ділянками контактний. Спостерігаються відкриті пори та мікротріщинки (до 2 мм), стінки яких вкриті піритом та бітумами.

*Сидерит* відмічається локальними прошарками (завтовшки до 10 см) переважно в підшовній та покрівельній частинах середньомайкопського розрізу. В основній сидеритовій масі міститься до 10 % кутастих та обкатаних зерен кварцу, які розподілені вельми нерівномірно,

спостерігаються поодинокі фрагменти мікрофауни поганої збереженості. Мікропори та мікротріщинки заліковані кременистим матеріалом.

**Літмологічна будова.** Літмологічні перетини демонструють принципові особливості структури відкладів середнього майкопу Причорноморського мегапрогину. Назагал, її формують літміти алевролітового (23 %), змішаного (22 %) та глинистого (55 %) полів. І хоча літмологічний склад керлеутського розрізу регіону відносно однотипний, спостерігаються певні відмінності між Причорноморсько-Кримським та Азово-Чорноморським осадово-порідними басейнами.

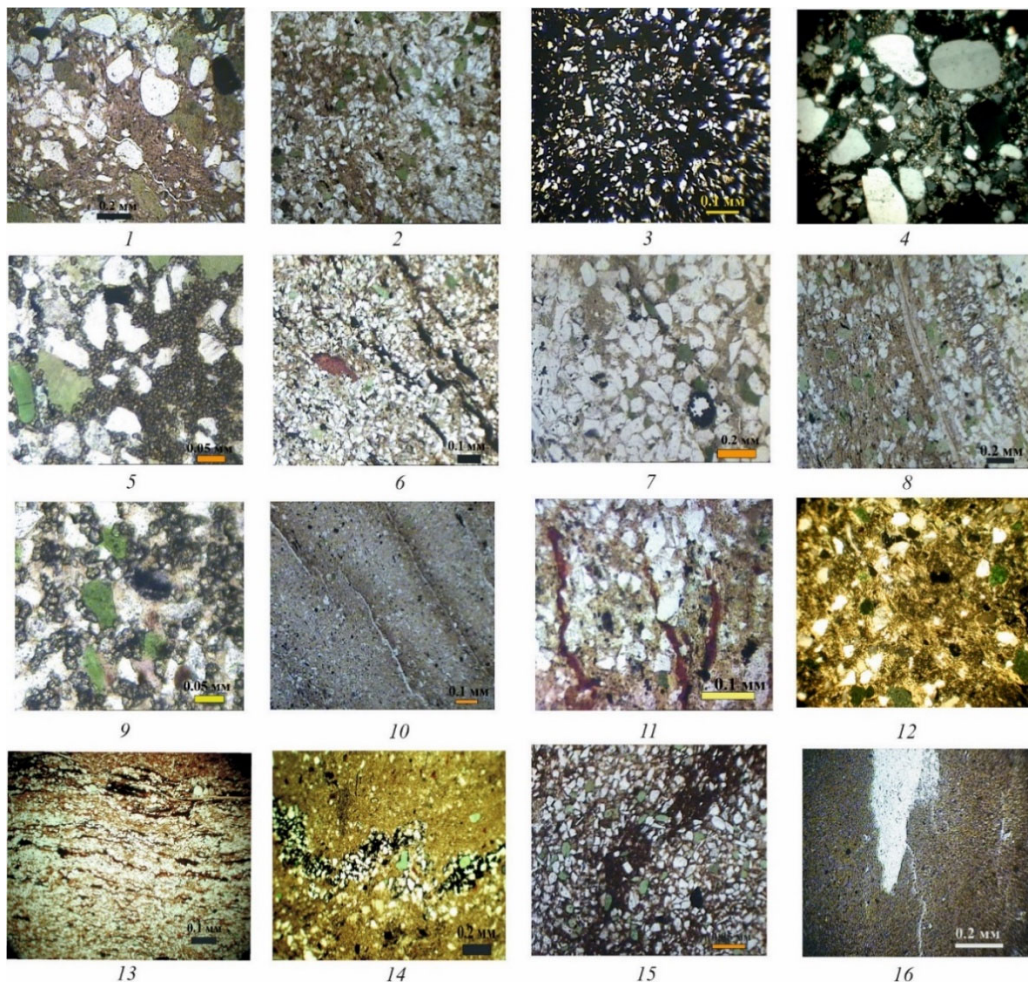
У межах *західних районів Азово-Чорноморського осадово-порідного басейну* (східні терени Рівнинного Криму) вміст алевролітових (IV–V поля) літмітів варіює від 0 до 65 % (середній 32 %), а сумарно з утвореннями змішаного (III поле, 9–34 %, середній 19 %) типу перевищує 52 % (Профілі I–I'; II–II'. рис. 4, 5).

Доволі чітко у розрізі виділяються чотири кластогенні пачки: три у верхньо- та одна у нижньокерлеутському: горизонти K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, (за Плахотним та ін., 1971).

Верхня пачка (K<sub>1</sub>) характеризується регіональним поширенням, щоправда її товщина варіює в широких межах від 20 м, в осьовій зоні Центральноазовського підняття до 200 м – на північному, південному та західному бортах Індольської депресії. Пачка складена утвореннями двох полів: змішаного (поле III) та алевролітового (поле IV) типів, з домінуванням останніх на східних схилах Центральнокримського підняття та на північному і південному бортах Індольської депресії. В центральних районах регіону товщина пачки

зменшується за рахунок заміщення кластогенних літмітів (поля III–IV) глинистими відмінами (VI поле). Літологічна структура пачки зазнає відповідних змін: вміст піщаного компонента знижується (з 5–10 до 2–4 %) натомість

алевролітового – зростає (з 47 до 53 %). При цьому товщина прошарків цих літотипів зменшується від 2–15 м на півночі (св. Стрілкова-2, -7) до 0,1–2 м на півдні (св. Советська-760, -762).



**Рис. 3. Структурно-речовинні особливості середньомайкопських порід Азово-Чорноморського осадово-порідного басейну:**

- 1 – алевроліт піскуватий глинистий з нерівномірним розподілом теригеного матеріалу. Чорні виділення – бітуми з піритом (св. Андріївська-2, інт. 2063–2069 м, ніколі X); 2 – алевроліт глауконіт-кварцовий з гідролудистим цементом (св. Джанкойська-21, інт. 873–877 м, ніколі X); 3 – алевроліт бітумінозний (чорне) (св. Півн. Владиславівська-1, інт. 1450–1460 м, ніколі X); 4 – алевроліт піскуватий із глинисто-сидеритовим цементом, включенням крупних (до 0,4 мм) обкатаних зерен кварцу (св. Стрілкова-20, інт. 657–665 м, ніколі X); 5 – алевроліт піскуватий глауконіт-кварцовий із порово-базальним сидеритовим цементом (св. Стрілкова-17, інт. 888–895 м, ніколі X); 6 – алевроліт із глинистим цементом (до 38%), видовженими виділеннями чорних та червонуватих бітумів (св. Стрілкова-17, інт. 544–550 м, ніколі X); 7 – пісковик алевритистий з відкритими порами, які по контуру вкриті піритом (св. Стрілкова-17, інт. 1014–1018 м, ніколі X); 8 – плевроліт глинистий з біогенними залишками. В середині однієї з форм (Б) світлі бітуми (св. Стрілкова-17, інт. 1085–1091 м, ніколі X); 9 – плевроліт глауконіт кварцовий із сидеритовим дрібнокристалічним цементом з виділеннями бурих бітумів (св. Джанкойська-21, інт. 884–887 м, ніколі X); 10 – аргіліт з оптично орієнтованою мікроструктурою із серією субпаралельних мікротріщин, інтенсивною бітумізацією (св. Джанкойська-21, інт. 862–866 м, ніколі X); 11 – шарувата аргіліт-алевролітова порода з виділеннями червоно-бурих бітумів та мікротріщиною по нашаруванню (св. Андріївська-2, інт. 2300–2306 м, ніколі X); 12 – аргіліт алевритистий з базальним гідролудистим цементом (св. Стрілкова-7, інт. 475–480 м, ніколі X); 13 – аргіліт алевритистий з тонкошаруватою мікротекстурою. Темно-бурі до чорних бітуми з піритом (св. Слюсарівська-1, інт. 2400–2410 м, ніколі II); 14 – аргіліт. Стиллітоподібний прошарок алевриту (з піритом) завтовшки близько 0,2 мм. (св. Слюсарівська-2, інт. 2925–2935 м, ніколі II); 15 – лінзоподібні скупчення глинистого матеріалу в алевроліті (св. Фонтанівська-4 гл. 2318 м, ніколі II); 16 – тріщинно-кавернозна зонка в аргіліті (св. Фонтанівська-11, інт. 2650–2657 м, ніколі II)

Кластогенні пачки ( $K_2$ ,  $K_3$ ) характеризуються аналогічними варіаціями товщин: від 20 м в осевій зоні Центральноазовського підняття до 200 м на бортах Індольської депресії. Складені пачки літмітами змішаного (III поле) та алевролітового (IV поле) типів, які по простяганню часто розщеплені глинистими утвореннями (VI–VII поля, західна перикліналь Центральноазовського підняття, профіль I–I') з формуванням 2–3-х підпачок завтовшки 20–

50 м. Літологічна структура пачки характеризується чергуванням пластів аргілітів (31–49 %) та алевролітів (50–56 %) з окремими прошарками пісковиків (1–13 %) (св. Стрілкова-7) (див. рис. 4, 5).

Локально поширена кластогенна підпачка  $K_{3a}$  завтовшки 100 м простежується на північному та південному бортах Індольської депресії.



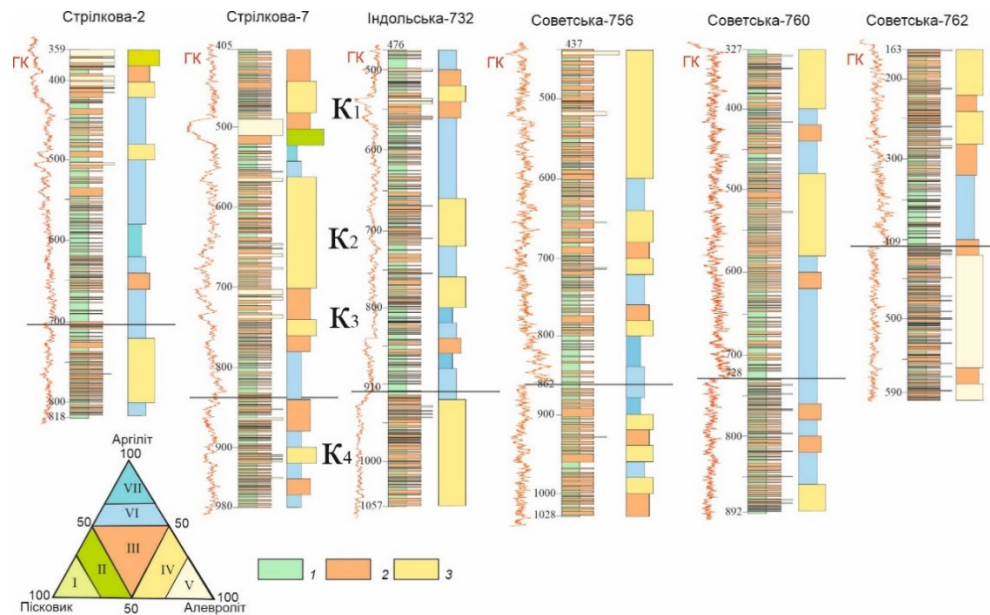


Рис. 4. Літолого-літмологічна структура розрізів середньомайкопської товщі заходу Азово-Чорноморського осадово-порідного басейну (східних районів Рівнинного Криму) та класифікаційна літмологічна трикутна діаграма: 1 – аргіліти, 2 – алевроліти, 3 – пісковики. K1–4 – кластогенні пачки (за Плахотним та ін., 1971)

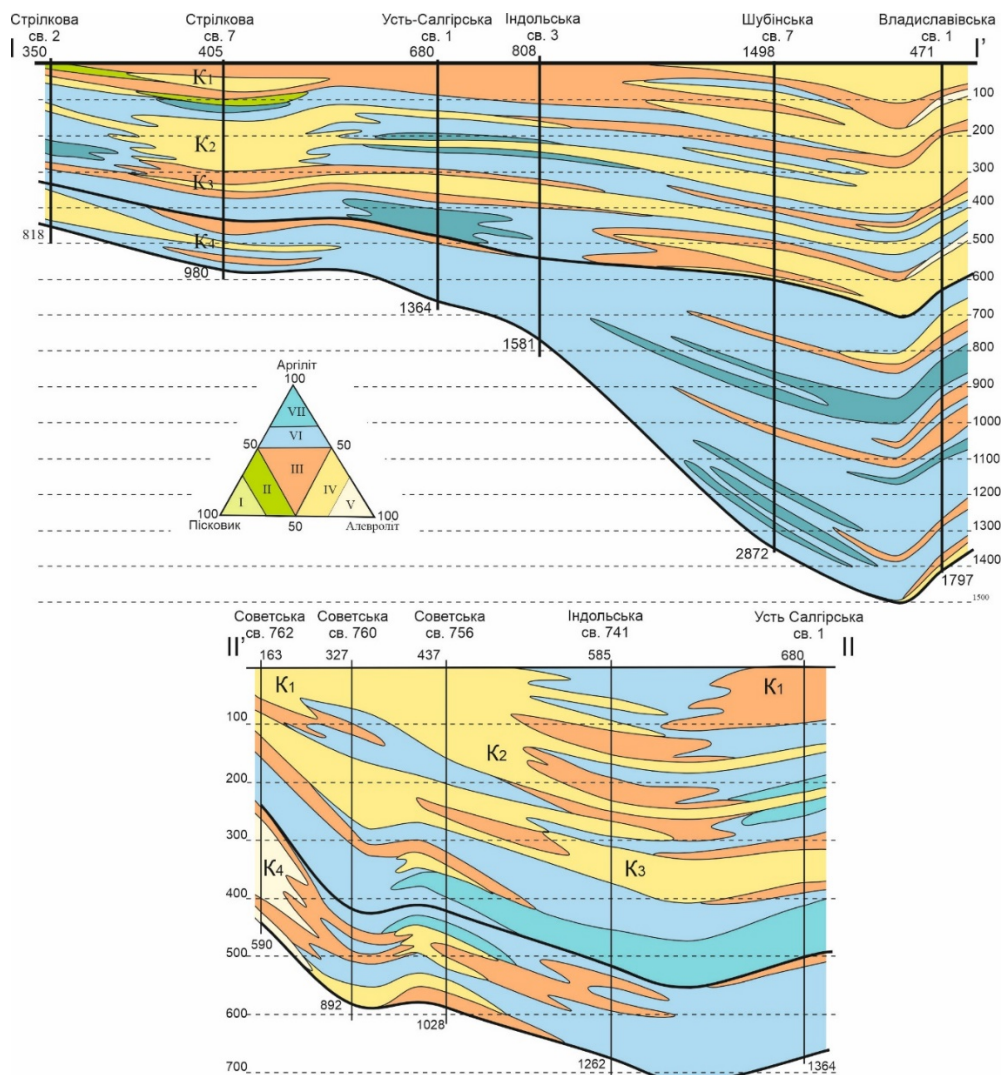


Рис. 5. Літмологічні перетини середньомайкопської товщі Азово-Чорноморського осадово-порідного басейну (східні райони Рівнинного Криму) та класифікаційна трикутна діаграма  
Примітка: Просторове положення перетинів див. на рис. 1

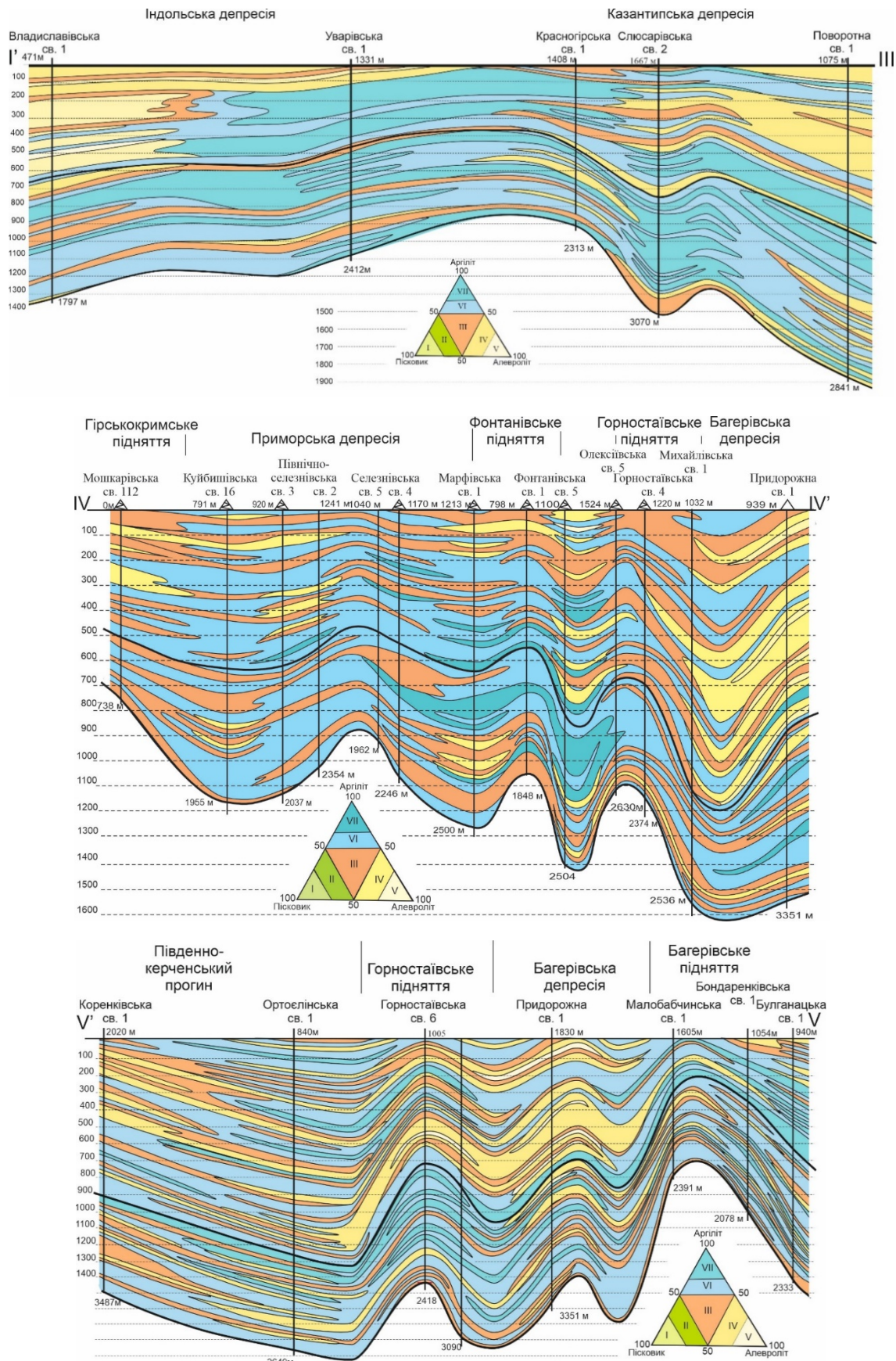


Рис. 6 Літологічні перетини середньомайкопської товщі Азово-Чорноморського осадово-породного басейну (Керченський півострів) та класифікаційна трикутна діаграма

Примітка: Просторове положення перетинів див. на рис. 1



Нижньокерлеутська кластогенна пачка К<sub>4</sub> Рівнинного Криму (товщина 20–200 м) має локальне поширення, найбільші її товщини простежуються на західному борті Індольської депресії (східний схил Центральнокримського підняття). Складена вона літмітами змішаного та алевролітового типів (поля III та IV відповідно), які в депресійних зонах потоншуються та розщеплюються глинистими (VI–VII поля) утвореннями на окремі підпачки завтовшки 20–40 м. У літологічній структурі пачки домінують алевроліти (48–59 %) та аргіліти (38–47 %) з товщиною окремих прошарків 0,5–3 м.

На відміну від східних районів Рівнинного Криму, в літологічній структурі середньомайкопських відкладів Керченського півострова не здається можливим виділення регіонально поширених крупних кластогенних пачок: загалом структура тонкошарувата (товщина літмітів 20–60 м) з домінуванням глинистих утворень (VI–VII класифікаційні поля, середнє 58 %), що перешаровуються зі змішаними (III поле, середнє 25 %), при локальному поширенні алевролітових літмітів (IV–V поля, середнє 17 %) (рис. 6, профілі I'–III'; IV–IV'; V–V').

У середній частині верхньокерлеутського розрізу Багерівської та Казантипської депресій і Горностаєвського підняття (Поворотна і Придорожна площі) виокремлюються алевролітові літміти (IV–V поля) завтовшки 20–200 м, які, ймовірно, є аналогами пачок К<sub>2</sub>–3. Локально подібні утворення завтовшки 20–40 м розвинені і в межах Фонтанівсько-Горностаєвської зони підняття (див. рис. 6). Розвиток незначних за площею та товщиною (20–40 м) алевролітових літмітів (IV–V полів) відмічено також у межах практично всіх депресійних зон керлеутського осадового басейну. Літологічна структура даних літмітів тонкошарувата – чергування алевролітів та аргілітів (товщина 0,2–0,5 м) з поодинокими прошарками пісковику (0,2–0,5 м) (рис. 7).

Літміти змішаного типу (III класифікаційного поля, завтовшки 20–60 м, локально до 100 м) максимально розвинені в межах східних схилів Гірськокримського (Мошкарівська, Куйбишевська площі), Фонтанівського та Горностаєвського підняття (див. рис. 6, 7). Літологічна будова літмітів не виявляє відчутних просторово-вікових варіацій і загалом є тонкошаруватою, з товщинами окремих прошарків від 0,2 до 3 м (див. рис. 7).

На решті території домінують (понад 50 %) глинисті літміти (VI, VII поля класифікаційного трикутника) (див. рис. 6), найбільші товщини яких (150–200 м), особливо у складі нижньокерлеутського розрізу, простежуються на східному борті Індольської та в межах Казантипської депресій (Уварівська, Красногирська, Слюсарівська площі, профіль I'–III').

У Причорноморсько-Кримському осадово-породному басейні максимальне поширення мають глинисті (поля VI та VII класифікаційного трикутника) літміти, які становлять у середньому 48 % від потужності середньомайкопської товщі (Гнідець та ін., 2023): профілі VI–VI'; VII–VII'; VIII–VIII'; IX–XI'; X–X', (рис. 8). Широкий, майже наскрізний розвиток піщано-алевролітових літмітів простежений у південно-західній частині регіону (площі Олімпійська, Десантна, Гамбурцева). Тут за потужності середньомайкопської товщі 40–200 м у її розрізі домінують утворення змішаного (III, до 100 %) та піщаного (II, до 61 %) класифікаційних полів. Подібна картина і на півночі регіону (Таврійська, Херсонська площі), де потужність середньомайкопської товщі варіює від 60 до 450 м. Тут виділяються літміти всіх шести класифікаційних полів, але водночас сумарний вміст утворень піщано-алевролітового типу (II–V) становить 45–65 %. На решті території частка піщано-алевролітових літмітів у розрізі керлеутської товщі не перевищує 25 %.

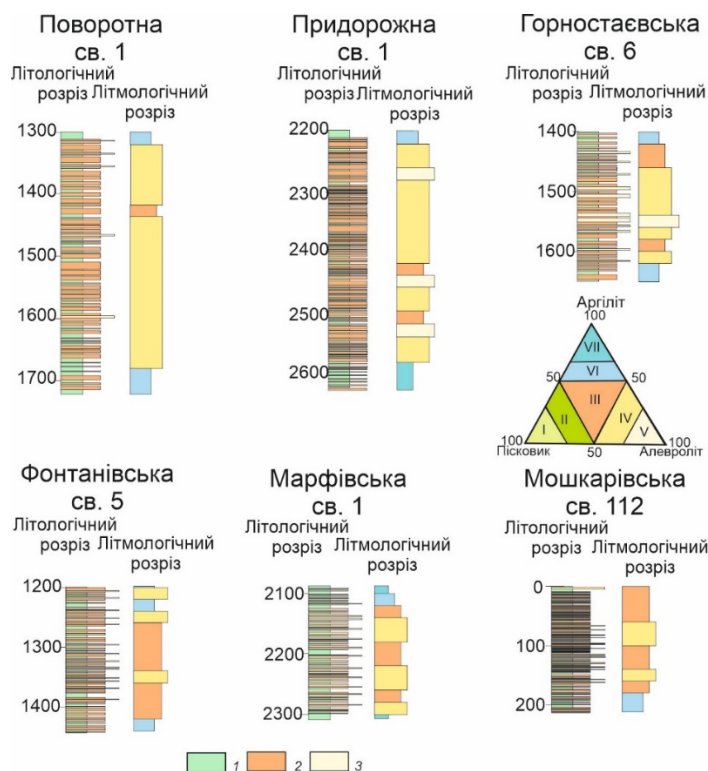


Рис. 7. Літологічні розрізи алевролітових (поля IV–V) та змішаних (поле III) літмітів середньомайкопської товщі Керченського півострова:

1 – аргіліти (глини); 2 – алевроліти; 3 – пісковики



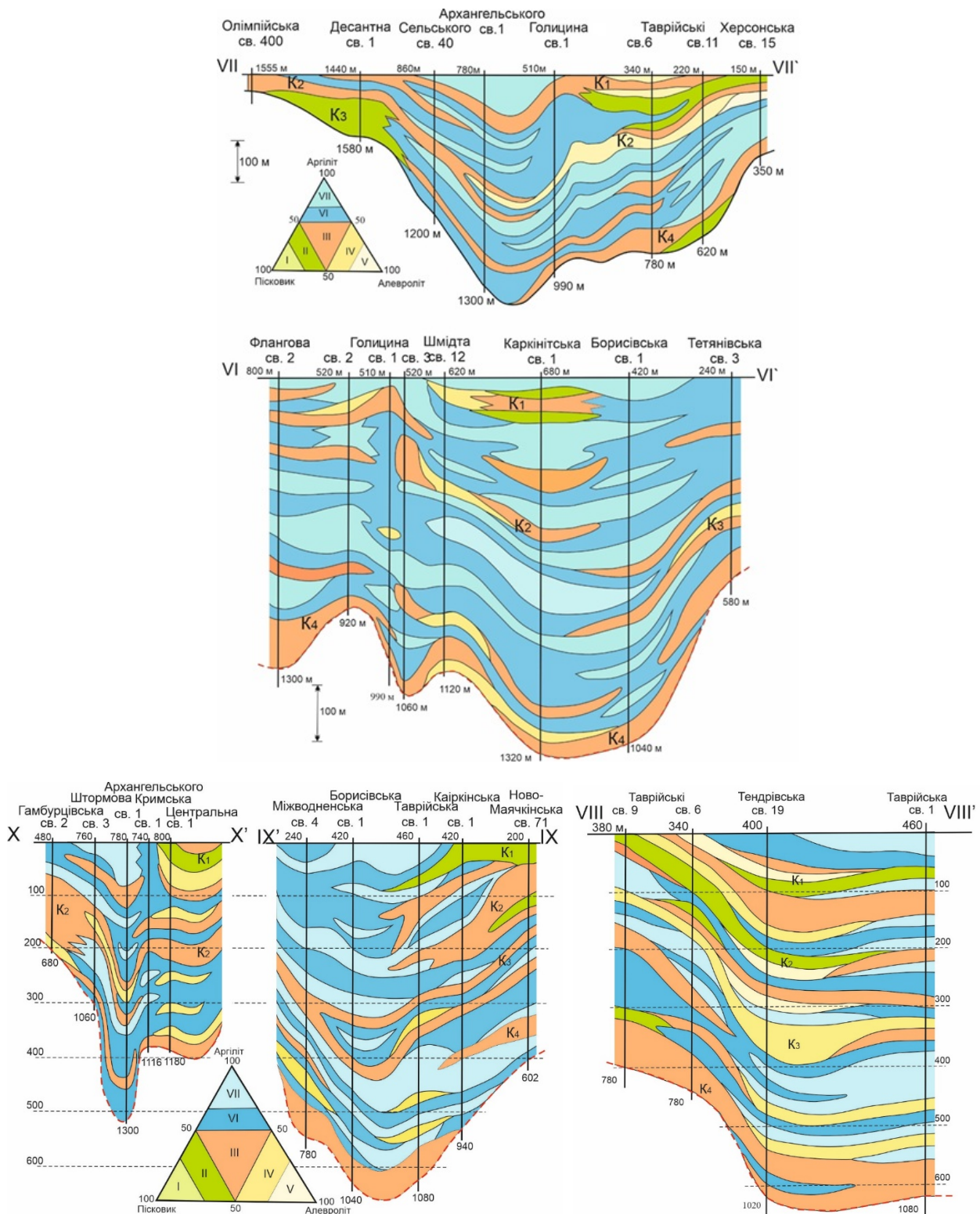


Рис. 8. Літологічні перетини середньомайкопської товщі Причорноморсько-Кримського осадово-породного басейну та класифікаційна трикутна діаграма (Гнідець та ін., 2023)

Примітка: Просторове положення перетинів див. на рис. 1

Доволі однозначно в розрізі північних та західних ділянок осадово-породного басейну виділяються субрегіональні кластогенні пачки (K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>, K<sub>4</sub>, за Плахотним та ін., 1971) (див. рис. 8).

Перша – K<sub>4</sub> (базальна), потужністю 20–80 м, локалізована переважно в склепіннях та на схилах підняттях у північних, західних та східних районах регіону (схили

Фено-Сарматського та Молдовського підняттях). На півдні та в осьових зонах депресій ці утворення не зафіксовано. Пачка складена в основному літмітами змішаного (III поле) з локальним розвитком піщаного (II поле) чи алевролітового (IV поле) типів. Розріз характеризується тонким перешаруванням алевролітів (0,2–1,0 м) та аргілітів (0,5–4,0 м), іноді пісковиків (0,1–0,5 м).

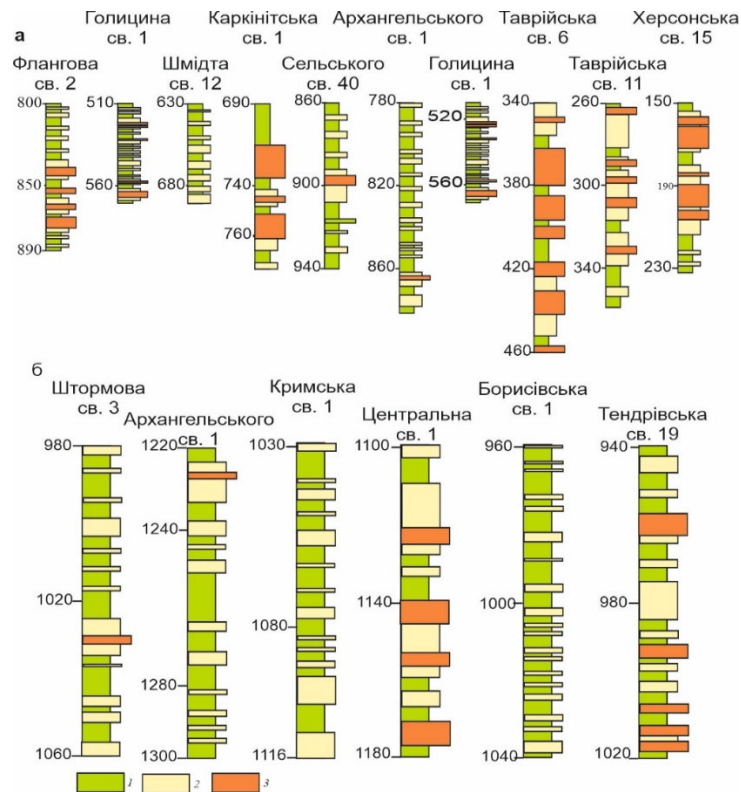


Рис. 9. Літологічні розрізи літмітів пачки  $K_1$  (а) та  $K_4$  (б) середньомайкопської товщі Причорноморсько-Кримського осадово-породного басейну (Гнідець та ін., 2023):  
1 – аргіліти; 2 – алевроліти; 3 – пісковики

Друга пачка ( $K_3$ ) тяжіє до середньої частини розрізу товщі і простежується локальними ділянками в межах майже всієї вивченої території (див. рис. 8). Потужність варіює від 20 до 40 м, а формують її переважно утворення змішаного (III поле), місцями (у північних ділянках регіону) піщаного (II поле) та алевролітового (IV поле) типів. Літологічній структурі на південному борті прогину властиве перешарування пластів пісковиків (30 %, потужністю 0,5–2,0 м) та алевролітів (55 %, потужністю 1,0–5,0 м) з поодинокими прошарками аргілітів (15 %, потужністю до 1,5 м).

Третя пачка ( $K_{2-1}$ ) відносно добре проявляється лише в розрізах на схилах Української моноклінали, де її потужність перевищує 50 м (див. рис. 8). У напрямку депоцентру осадового басейну вона різко виклинюється. Складена пачка літмітами змішаного (III поле), алевролітового (IV поле) та піщаного (II поле) типів, у розрізі, яких перешаровуються пісковики (потужністю до 10 м) та алевроліти (0,5–15,0 м) з поодинокими прошарками аргілітів (1,0–3,0 м).

#### Дискусія і висновки

За результатами літологічних та літмологічних досліджень визначено закономірності просторово-вікового поширення осадових комплексів керлеутської товщі майкопу Причорноморського мегапрогину. Виокремлено два осадово-породні басейни – Причорноморсько-Кримський та Азово-Чорноморський, що різняться за характером розподілу товщин та літмологічної структури розрізу, водночас виявляють доволі одноманітний мінералогіко-петрографічний склад порід з домінуванням глинистих відмін з мінливим вмістом уламкового алевролітового, іноді карбонатного матеріалу.

З'ясовано літологофаціальну зональність середнього майкопу Причорноморсько-Кримського та Азово-Керченського регіонів, виділено чотири літологічні комплекси:

*піщано-алевролітовий (кlastогенів понад 60 %); алевролітовий (кlastогенів 50–60 %); аргіліто-алевролітовий (40–60 %) та аргілітовий (менше 40 %), що закономірно заміщують один одного від зон облямування денудаційних областей до депресійних ділянок (відповідно).*

Вивчено особливості літмологічної структури розрізів товщі середньомайкопського віку. Встановлено, що вона сформована 20–84 літмітами регіонального, зонального та локального поширення, завтовшки 20–200 м, алевролітового (IV–V поля, 23 %), змішаного (III поле, 22 %) та глинистого (VI–VII поля, 55 %) типу. Виокремлено кілька стратиграфічних рівнів розвитку різнорангових алевроліто-піщаних пачок ( $K_1$ – $K_2$ – $K_3$ – $K_4$ ), що розмежовані глинистими утвореннями та встановлено особливості їх просторового поширення. Виявлено різницю літмологічної будови розрізу товщі двох осадових басейнів, що проявилась у домінуванні тонкошаруватої структури в розрізах керлеуту Азово-Чорноморського басейну (літмологічні комплекси завтовшки 20–40 м) на противагу грубошаруватій структурі Причорноморсько-Кримського (товщини літмітів 20–100 м).

**Внесок авторів:** Володимир Гнідець – концептуалізація, написання (оригінальна чернетка); Костянтин Григорчук – написання (перегляд і редагування), методологія; Анастасія Ревер – написання (оригінальна чернетка), формальний аналіз; Оксана Кохан – написання (перегляд і редагування), валідація даних.

#### Список використаних джерел

Аленкин, В. М., Баландин, Ю. Г., Бондаренко, В. Г., Воскобойников, В. М., Григорьев, А. В., Иванов, Ю. К., Иноземцев, Ю. И., Кириченко, О. Н., Конилов, Е. Г., Котлов, В. Ф., Краковский, Б. И., Куприн, П. Н., Лебедев, Ю. С., Лимонов, А. Ф., Луцив, Я. К., Мельник, В. И., Моргунов, Ю. Г., Науменко, П. И., Огородников, В. И., & Янко, В. В. (1985). *Геология шельфа УССР. Литология*. Наукова думка.



Апостолова, М. Я. и др. (1981). *Петрографическое изучение пород и стратиграфическое расчленение вскрываемых разрезов на площадях Северного и Западного Причерноморья и Крыма* [Отчет]. Фонды ПО "Крымгеология".

Апостолова, М. Я. и др. (1982). *Петрографическое изучение пород и стратиграфическое расчленение вскрываемых разрезов на площадях Северного и Западного Причерноморья и Крыма* [Отчет]. Фонды ПО "Крымгеология".

Астахов, Т. В., Горак, В. С., Краевая, Е. А. и др. (1984). *Геология шельфа УССР. Стратиграфия*. Наукова думка.

Балуховский, А. Н., Буш, В. А., Волков, Ю. В., Гатинский, Ю. Г., Казьмин, В. Г., Калимулин, С. М., Куликова, Л. И., Миледин, А. К., Натапов, Л. М., Пугачева, И. П., Суетенко, О. Д., Филиппова, И. Б., & Ясаманов, Н. А. (Составители). (1998). *Палеогеографический атлас Северной Евразии* (Н. Ю. Бочарова, Л. П. Зоненшайн, М. К. Кононов, К. Скотиз, составители палинспастических реконструкций). Институт тектоники литосферных плит РАН. [http://neotec.ginras.ru/geomaps/M300\\_Euras.N\\_1998\\_Paleogeography\\_Paleogeograficheskiy-atlas-severnoy-evrazii.html](http://neotec.ginras.ru/geomaps/M300_Euras.N_1998_Paleogeography_Paleogeograficheskiy-atlas-severnoy-evrazii.html)

Бондаренко, В. Г. и др. (1967). *Минералого-петрографическое изучение отложений на разбуриваемых трестом "Крымнефтегазразведка" площадях в 1966 году* [Отчет]. Симферополь.

Бондаренко, В. Г. и др. (1978). *Петрографическое изучение пород и стратиграфическое расчленение вскрываемых разрезов на площадях объединения "Крымгеология" (Крымская, Одесская области, северо-западная часть Черного моря, западная Азовского моря)* (Инв. № 6782) [Отчет]. Фонды ПО "Крымгеология".

Вернигорова, Ю. В., & Рябоконь, Т. С. (2018). Майкопские отложения (олигоцен – нижний миоцен) Керченского полуострова: история изучения, полемика, стратиграфия. *ІГН НАН України*.

Вижва, С., Михайлов, В., & Онисчук, И. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісн. Київ. ун-ту. Геологія*, 4(79), 12–20.

Герасимов, М. Е., Бондарчук, Г. К., Скорик, А. М. та ін. (2006). Тектонічна карта півдня України з позицій актуальної геодинаміки. В *Геодинаміка, сейсмічність і нафтогазоносність Черноморсько-Каспійського регіону: матеріали VI Міжнародної конференції "Крим-2005": тези доповіді* (с. 11–40). Агео.

Гнідець, В. П., Григорчук, К. Г., Кохан, О. М., Ревер, А. О., & Баланчук, Л. В. (2023). *Літогенез майкопських відкладів Причорноморського мегапрогину*. <http://igccm.org.ua/wp-content/uploads/2023/12/ЛІТОГЕНЕЗ-МАЙКОПСЬКИХ-ВІДКЛАДІВ.pdf>

Гожик, П. Ф., Маслун, Н. В., Плотнокова, Л. Ф., Іванік, М. М., Якушин, Л. М., & Іщенко І. І. (2006). *Стратиграфія мезокайнозойських відкладів північно-західного шельфу Чорного моря*. Логос.

Зоненшайн, Л. П., Деркур, Ж., Казьмин, В. Г., Рикун, Л. Э., & Книппер, А. Л. (1987). *Эволюция Тетиса. В История океана Тетис* (с. 104–115). Издательство Института океанологии АН СССР.

Зосимович, В. Ю., & Шевченко, Т. В. (2015). Палеогенові відклади північноукраїнської палеоседиментативної провінції. *Палеоокеанографія та палеоседиментогенез. Збірник наукових праць інституту геологічних наук НАН України*, 8, 68–121.

Іванюта, М. М. (Ред.). (1998). *Атлас родовищ нафти і газу України: Т. VI. Південний нафтогазоносний регіон*. Центр Європи.

Карогодин, Ю. Н. (1980). *Седиментационная цикличность. Недра*.

Карпенко, І. В. та ін. (2005). *Наукове обґрунтування геологічної моделі теригенних відкладів палеогену західного замикання Каркінінтського прогину з виділенням ділянок для постановки подальших геофізичних досліджень та пошукового буріння* (звіт). Фонди УкрДГРІ.

Клюшина, Г. В. (2009). Літологічні особливості уламкових порід майкопської серії північно-західного шельфу Чорного моря. *Літологія, геологія морів та океанів. Зб. наук. праць ІГН*, 2(83).

Лазарук, Я. Г. (2010). Геологічна модель родовища Субботіна прикерченського шельфу Чорного моря. *Нафтова і газова промисловість*, 2, 9–11.

Лукін, О. Ю. та ін. (2008). *Результати виконання геолого-геофізичних і петрофізичних досліджень керну і продуктивних відкладів майкопської серії площі Субботіна (за даними свердловин № 1, 403)* [Звіт]. Чернівці.

Михайлов, В. (2017). Сопоставительная характеристика майкопской серии Каспийско-Черноморского региона. *Вісн. Київ. ун-ту. Геологія*, 2(77), 59–71.

Михайлов, В. А., Вакарчук, С. Г., Вижва, С. А., Загнітко, В. М., Коваль, А. М., Крупський, Ю. З., Куровець, І. М., & Харченко, М. В. (2021). *Перспективи нагромадження ресурсної бази вуглеводнів України за рахунок нетрадиційних джерел*. Київський університет.

Михайлов, В. А., Куровець, І. М., Сеньковський, Ю. М., Вижва, С. А., Григорчук, К. Г., Загнітко, В. М., Гнідець, В. П., Карпенко, О. М., & Куровець, С. С. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. III. Південний нафтогазоносний регіон*. Київський університет.

Науменко, А. Д., Науменко, М. А., & Коржнев, П. М. (2010). Новые черты геологического строения керлеутских (майкопских) отложений Керченского сегмента Азовского и Черного морей. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана*, 4, 40–49.

Окуловский, С. Н. (1987). Майкопские отложения северо-западного шельфа Черного моря. *Геология нефти и газа*, 10, 36–40.

Плахотный, Л. Г., Григорьева, В. А., Гайдук, И. С., Ромов, В. Б., & Лагутин, А. А. (1971). Особенности распространения песчано-алевритовых пачек в майкопских отложениях на юге Украины. *Геологический журнал*, 4(31), 41–51.

Полухтович, Б. М. та ін. (1994). *Вивчити умови седиментації палеогенових відкладів Керченського півострова з метою виявлення закономірностей формування порід колекторів і уточнення напрямків нафтогазопрошукових робіт* (№ 8375) [Звіт]. Фонди УкрДГРІ.

Скляр, Л. О. та ін. (2007). *Вивчення петрофізичних особливостей порід майкопу Азово-Керченського регіону і можливостей прогнозу розповсюдження в них колекторів нафти та газу* [Звіт]. Симферополь.

Стовба, С. М. (2005). *Геолого-геофізична оцінка нафтогазоносного потенціалу та виділення першочергових об'єктів пошуків вуглеводнів для українського сектора акваторій Чорного та Азовського морів* [Звіт]. Київ.

Цихоща, Н. Н., Пустовойт, І. І., & Крочак, М. Д. (1986). Літолого-фаціальна характеристика порід майкопської серії північно-західного шельфу Чорного моря. *Доп. АН УРСР. Сер. Б*, 12, 21–24.

Dercourt, J., Gaetani, M., Vrielynck B. et al. (2000). *Peri-Tethys paleogeographical atlas*. Galloway.

## References

Alenkin, V. M., Balandin, Yu. G., Bondarenko, V. G., Voskoboinikov, V. M., Grigoriev, A. V., Ivanov, Yu. K., Inozemtsev, Yu. I., Kirichenko, O. N., Konikov, E. G., Kotlov, V. F., Krakovsky, B. I., Kuprin, P. N., Lebedev, Yu. S., Limonov, A. F., Lutsiy, Y. K., Melnik, V. I., Morgunov, Yu. G., Naumenko, P. I., Ogorodnikov, V. I., & Yanko, V. V. (1985). *Geology of the Ukrainian SSR shelf. Lithology*. Naukova Dumka [in Russian].

Apostolova, M. Ya. et al. (1981). *Petrographic study of rocks and stratigraphic subdivision of exposed sections in the areas of the Northern and Western Black Sea region and Crimea* [Report]. Funds of the PO "Krymgeologiya" [in Russian].

Apostolova, M. Ya. et al. (1982). *Petrographic study of rocks and stratigraphic subdivision of exposed sections in the areas of the Northern and Western Black Sea region and Crimea* [Report]. Funds of the PO "Krymgeologiya" [in Russian].

Astakhov, T. V., Gorak, V. S., Kraevaya, E. A. et al. (1984). *Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Stratigraphy*. Naukova Dumka.

Balukhovskiy, A. N., Bush, V. A., Volkov, Yu. V., Gatinsky, Yu. G., Kazmin, V. G., Kalimulin, S. M., Kulikova, L. I., Miledin, A. K., Natapov, L. M., Pugacheva, I. P., Suetenko, O. D., Filippova, I. B., & Yasamanov, N. A. (Compiled). (1998). *Paleogeographical atlas of Northern Eurasia* (N. Yu. Bocharova, L. P. Zonenshain, M. K. Kononov, K. Skotiz, compilers of palinspastic reconstructions). Institute of Plate Tectonics, Russian Academy of Natural Sciences [in Russian]. [http://neotec.ginras.ru/geomaps/M300\\_Euras.N\\_1998\\_Paleogeograph\\_Paleogeograficheskiy-atlas-severnoy-evrazii.html](http://neotec.ginras.ru/geomaps/M300_Euras.N_1998_Paleogeograph_Paleogeograficheskiy-atlas-severnoy-evrazii.html)

Bondarenko, V. G., et al. (1967). *Mineralogical and petrographic study of sediments in areas drilled by the Krymneftegazrazvedka trust in 1966* [Report]. Simferopol [in Russian].

Bondarenko, V. G. et al. (1978). *Petrographic study of rocks and stratigraphic subdivision of exposed sections in areas of the Krymgeologiya association (Crimean, Odessa regions, northwestern part of the Black Sea, western part of the Azov Sea)* (Inv. No. 6782) [Report]. Funds of the Krymgeologiya association [in Russian].

Dercourt, J., Gaetani, M., Vrielynck, B. et al. (2000). *Peri-Tethys paleogeographical atlas*. Galloway.

Gerasimov, M. E., Bondarchuk, G. K., Skorik, A. M. et al. (2006). Tectonic map of modern Ukraine from the position of actual geodynamics. In *Geodynamics, seismicity and oil and gas potential of the Black Sea-Caspian region: materials of the VI International Conference "Crime-2005": abstracts of reports* (pp. 11–40). Агео [in Ukrainian].

Gnidec V. P., Grigorchuk K. G., Kokhan O. M., Rever A. O., & Balandyuk L. V. (2023). *Lithogenesis of the Maikop deposits of the Black Sea megaprogyne* [in Ukrainian]. <http://igccm.org.ua/wp-content/uploads/2023/12/LITHOGENESIS-MAIKOPSKIKH-VIDKLADIV.pdf>

Gozhik, P. F., Maslun, N. V., Plotnikova, L. F., Ivanik, M. M., Yakushin, L. M., & Ishchenko I. I. (2006). *Stratigraphy of Meso-Cenozoic deposits of the North-Western shelf of the Black Sea*. Logos [in Ukrainian].

Ivanyuta, M. M. (Ed.). (1998). *Atlas of oil and gas deposits of Ukraine: Vol. VI. South oil-gas-bearing region*. Center of Europe [in Ukrainian].

Karogodin, Yu. N. (1980). *Sedimentation Cyclicity*. Nedra [in Russian].

Karpenko, I. V. et al. (2005). *Scientific substantiation of the geological model of the Paleogene terrigenous deposits of the western closure of the Karkinit'ska depression with the allocation of areas for further geophysical research and exploratory drilling (report)*. Funds of the Ukrainian State Geological Institute [in Ukrainian].

Klyushina, G. V. (2009). Lithological features of clastic rocks of the Maikop series of the northwestern shelf of the Black Sea. *Lithology, geology of seas and oceans. Collection of scientific works of the IGН*, 2(83) [in Ukrainian].

Lazaruk, Ya. G. (2010). Geological model of the Subbotina deposit of the Kerch shelf of the Black Sea. *Oil and gas industry*, 2, 9–11 [in Ukrainian].

Lukin, O. Yu. et al. (2008). *Results of geological, geophysical and petrophysical studies of the core and productive deposits of the Maikop series of the Subbotina area (according to well data No. 1, 403)* [Report]. Chernihiv [in Ukrainian].



Mikhailov, V. (2017). Comparative characteristics of the Maikop series of the Caspian-Black Sea region. *Visn. Kyiv. University. Geology*, 2(77), 59–71 [in Ukrainian].

Mykhaylov, V. A., Kurovets, I. M., Senkovsky, Y. M., Vyzhva, S. A., Hryhorchuk, K. G., Zagnitko, V. M., Gnids, V. P., Karpenko, O. M., & Kurovets, S. S. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book III. Southern oil and gas region*. Kyiv University [in Ukrainian].

Mykhaylov, V. A., Vakarchuk, S. G., Vyzhva, S. A., Zagnitko, V. M., Koval, A. M., Krupsky, Yu. Z., Kurovets, I. M., & Kharchenko, M. V. (2021). *Prospects for increasing the resource base of hydrocarbons of Ukraine at the expense of unconventional sources*. Kyiv University [in Ukrainian].

Naumenko, A.D., Naumenko, M.A., & Korzhnev, P.M. (2010). New features of the geological structure of the Kerleut (Maikop) deposits of the Kerch segment of the Azov and Black Seas. *Geology and useful minerals of the World Ocean*, 4, 40–49 [in Russian].

Okulovsky, S. N. (1987). Maikop deposits of the northwestern shelf of the Black Sea. *Geology of oil and gas*, 10, 36–40 [in Russian].

Plakhotny, L. G., Grigorieva, V. A., Gaiduk, I. S., Romov, V. B., & Lagutin, A. A. (1971). Peculiarities of distribution of sandy-silty units in the Maikop deposits in the south of Ukraine. *Geological Journal*, 4(31), 41–51 [in Russian].

Polukhtovych, B. M. et al. (1994). *To study the conditions of sedimentation of Paleogene deposits of the Kerch Peninsula in order to clarify the patterns of formation of reservoir rocks and clarify the directions of oil and gas exploration work (No. 8375)* [Report]. Funds of the Ukrainian State Institute of Geological and Geophysical Research [in Ukrainian].

Sklyar, L. O. et al. (2007). *Study of petrophysical features of Maikop rocks of the Azov-Kerch region and possibilities of forecasting the distribution of oil and gas reservoirs in them* [Report]. Simferopol [in Ukrainian].

Stovba, S. M. (2005). *Geological and geophysical assessment of oil and gas potential and allocation of priority hydrocarbon search objects for the Ukrainian sector of the Black and Azov seas* [Report]. Kyiv [in Ukrainian].

Tsikhotska N. N., Pustovoit I. I., & Krochak M. D. (1986). Lithological and facies characteristics of rocks of the Maikop series of the northwestern shelf of the Black Sea. *Supplement of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR. Ser. B*, 12, 21–24 [in Ukrainian].

Vernigorova, Yu. V., & Ryabokon, T. S. (2018). Maikop deposits (Oligocene – Lower Miocene) of the Kerch Peninsula: history of study, controversy, stratigraphy. *IGS NAS of Ukraine* [in Russian].

Vyzhva, S., Mikhailov, V., & Onishchuk I. (2017). Petrophysical features of rocks of the Maikop series of the Crimean-Black Sea region. *Visn. Kyiv. University. Geology*, 4(79), 12–20 [in Russian].

Zonenshain, L. P., Derkur, J., Kazmin, V. G., Rikul, L. E., & Knipper, A. L. (1987). Evolution of Tethys. In *History of the Tethys Ocean* (pp. 104–115). Publishing House of the Institute of Oceanology, USSR Academy of Sciences [in Russian].

Zosymovich, V.Yu., Shevchenko, T.V. (2015). Paleogene sediments of the North Ukrainian paleosedimentary province. *Paleoceanography and paleosedimentogenesis. Collection of scientific papers of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, vol. 8, pp. 68–121 [in Ukrainian].

Отримано редакцію журналу / Received: 21.03.25

Прорецензовано / Revised: 01.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Volodymyr HNIETS<sup>1</sup>, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0009-0001-6372-7878

e-mail: vgnidets53@gmail.com

Kostiantyn HRYHORCHUK<sup>1</sup>, DSc (Geol.)

ORCID ID: 0000-0003-1595-0968

e-mail: kosagri@ukr.net

Anastasiia REVER<sup>1</sup>, Engineer

ORCID ID: 0009-0001-5989-4542

Oksana KOKHAN<sup>1</sup>, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0009-0009-1075-9591

e-mail: kohanom8@gmail.com

<sup>1</sup>Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of the NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

## LITHOLOGICAL STRUCTURE AND FACIES FEATURES OF THE KERLEUTIAN SEDIMENTS OF THE BLACK SEA MEGADEPRESSION

**Background.** As part of the Maikop sedimentary complex of the Black Sea megadepression, the Middle Maikop deposits are the most interesting in economic aspect, which is proven by the discovery of a number of oil and gas fields. The Middle Maikop deposits in the lower and upper subhorizons of the Kerleut regostorey usually conformably lie on the Lower Maikop deposits, and are overlapped without a visible break by the Upper Maikop deposits. The completeness of their section is characterized by significant spatial variations. The maximum thicknesses (over 2000 m) are observed on the territory of the Kerch Peninsula and in the southeastern regions of the Plain Crimea (1800 and more meters). Instead, in the north of the Plain Crimea in the Syvash and Northern Black Sea, shortened sections have been discovered, the thickness of which ranges from 200–300 m to 400–500 m. Within the water area of the northwestern shelf of the Black Sea, it does not exceed 650 m. In tectonic terms, the Black Sea megadepression consists of several coulisse-like articulated negative structural elements of a higher order: the Karkinit-North Crimean, Indolo-Kuban and South Kerch depressions. The aim of the work is to establish the features of the lithological and lithomorphological structure of the Middle Maikop (Kerleut) stratum of the Black Sea megadepression, to study the structural-textural and mineralogical-petrographic features of the rocks in the context of reconstructing the conditions of their sedimentation.

**Methods.** Lithological dismembering of well sections was carried out by interpreting the results of well logs (radioactive methods). The features of the development of sedimentary bodies of different composition were clarified on the basis of the segregate of lithmites according to the method (Karogodyn, 1980). This approach was tested in the study of the Maikop layers of the North Crimean and Indolo-Kuban depressions (Gnidets et al., 2023). The work used the breakdowns developed and adopted for use by geologists of the KP "Pivdenyekoecenter". Petrographic studies (over 400 thin sections, collection of the Department of Sedimentology of Fuel Provinces of the Institute of Geology and Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine) were performed by the authors under a Carl Zeiss Jena polarizing microscope.

**Results.** The spatial-age features of the lithological-lithomorphological structure of the Kerleut strata of the Black Sea megadepression have been clarified. Four lithological complexes have been identified: sandy-silty (clastic rocks over 60 %); silty (50–60 %); argillaceous-silty (40–60 %) and argillaceous (less than 40 %), which are characterized by the regularity of replacement from the marginal parts to the depocenters of depressions. Sections of the middle Maikop stratum are composed of 20–84 lithmites of regional, zonal and local distribution, 20–200 m thick, silty (23 %), mixed (22 %) and clayey (55 %) fields. Several levels of development of different-rank silty-sandy units (K1–K2–K3–K4) have been identified, and the features of their spatial distribution have been established. The specificity of the lithological structure of the sediments of the Black Sea-Crimean (thickness of lithology bodies up to 100 m) and Azov-Black Sea (thickness of lithology bodies no more than 40 m) sedimentary-rock basins has been revealed.

**Conclusions.** The established features of the spatial-age variability of the lithological-lithomorphological structure of the Middle Maikop stratum will serve as the basis for creating a model of the conditions of their sedimentation within the Crimean segment of the eastern Paratethys, will contribute to understanding the nature of the spatial-age distribution of reservoir rocks and seals, and will determine the main directions of geological exploration work in the region.

**Keywords:** Paratethys, Black Sea megadepression, Middle Maikop, Kerleutian horizon, lithogenesis.

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/10.17721/1728-2713.109.03>

Сергій ВИЖВА<sup>1</sup>, д-р. геол. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0003-4091-6649  
e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Дмитро ВЕНГРОВИЧ<sup>2</sup>, канд. фіз.-мат. наук  
ORCID ID: 0000-0002-1901-5697  
e-mail: vengrovich@igph.kiev.ua

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

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

Анна ДАЦЕНКО<sup>2</sup>, інженер  
e-mail: annadatsenko290490@gmail.com

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут геофізики НАН України, Київ, Україна

**ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОТІКАННЯ НАФТИ  
ЧЕРЕЗ ПОРОДУ-КОЛЕКТОР У ПЛАСТОВИХ УМОВАХ  
(НА ПРИКЛАДІ ПІСКОВИКІВ РОЗУМІВСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА)**

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

**Вступ.** Висвітлено результати фізичного моделювання протікання нафти через породу-колектор (пісковик Розумівського нафтогазоконденсатного родовища). Мета досліджень полягала у вивченні петрофізичних параметрів зразків керну пісковиків та фізичного моделювання процесу протікання нафти через них у пластових умовах.

**Методи.** Визначення петрофізичних параметрів (густина, пористість, структура пустотного простору, проникність) зразків пісковиків в атмосферних умовах виконувались стандартними методами. Для фізичного моделювання процесу протікання нафти через пісковик використовувалась спеціальна установка високого тиску.

**Результати.** Досліджено фільтраційно-ємнісні характеристики зразків пісковиків за атмосферних умов та фізичного моделювання пластових умов. Наведено значення фільтраційно-ємнісних параметрів досліджених порід, а також їх порівняння. Виконано оцінку структури пустотного простору порід та їх аналіз. Наведено результати досліджень проникності порід для нафти в різних РТ-умовах.

**Висновки.** За допомогою кореляційного аналізу встановлено ряд кореляційних залежностей між проникністю досліджених порід і температурою та тиском у пластових умовах. Ці залежності можуть бути використані при інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів порід-колекторів. Надалі результати даного дослідження будуть базою для вивчення впливу вібро-хвильових та хімічних методів інтенсифікації видобутку вуглеводнів на фільтраційні властивості порід-колекторів.

**Ключові слова:** пісковики, фільтраційно-ємнісні параметри, густина, коефіцієнти пористості, проникності та залишкового водонасичення, структура пустотного простору, пластові умови, кореляційні залежності.

## Вступ

**Постановка проблеми.** Під час вивчення порід-колекторів, що вміщують вуглеводні, важливу роль відіграють геофізичні та петрофізичні дослідження, а також методи математичного моделювання, на основі яких визначають перспективність нафтогазонасичення та оцінюють способи і методи їх промислової розробки. Водночас важливим є фізичне моделювання пластових умов та дослідження фільтраційно-ємнісних властивостей зразків керну в атмосферних умовах та умовах, що моделюють пластові. Однак такі дослідження проводять у недостатніх обсягах, а публікації про них практично відсутні.

У статті висвітлено фільтраційно-ємнісні параметри колекції зразків пісковиків та результати фізичного моделювання процесу протікання нафти через них у пластових умовах.

**Аналіз публікацій за темою досліджень.** Вивченню фізичних властивостей порід нафтогазоперспективних районів України присвячена низка публікацій (Вижва та ін., 2013, 2014, 2017–2022 а, б; Vyzhva et al., 2017, 2019; Iuras et al., 2023; Карпенко, Башкіров, & Карпенко, 2014; Карпенко, Михайлов, & Карпенко, 2015; Маслов, Оніщук, & Шинкаренко, 2017; Михайлов та ін., 2014, 2018; Нестеренко,

2010; Орлюк та ін., 2011, 2013, 2018; Orlyuk et al., 2018 а, б; Orlyuk, Marchenko, & Bakarijeva, 2021; Пашкевич, Орлюк, & Лебедь, 2014; Рибалка, & Карпенко, 2016; Соболь, & Карпенко, 2021) та багатьох інших авторів. Петрофізичні параметри порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень, тому їх лабораторним дослідженням приділяють значну увагу. Водночас петрофізичні параметри порід і кореляційні залежності між ними мають досить виражений індивідуальний характер стосовно 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.** Проблема пошуків та вивчення на території України як традиційних, так і нетрадиційних джерел вуглеводнів є надзвичайно актуальною, зважаючи на необхідність забезпечення енергетичної незалежності України. Тому дослідження петрофізичних властивостей гірських порід з метою оцінки перспективності геологічних структур і комплексів на вуглеводні має важливе

© Вижва Сергій, Венгрович Дмитро, Оніщук Віктор, Оніщук Іван, Даценко Анна, 2025

значення. Як вже зазначалося, петрофізичні властивості порід необхідні під час інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин, а також для розробки найбільш ефективної технології вилучення вуглеводнів, зокрема і оцінки параметрів гідророзриву пласта.

Встановлено, що кореляційні зв'язки між фільтраційно-ємнісними параметрами і даними свердловинних і польових геофізичних методів досить складні і потребують ретельного вивчення. Комплекс лабораторних петрофізичних досліджень є основою для визначення цих зв'язків. Дані, отримані в результаті лабораторних досліджень про зміни густини порід, їх питомого електричного опору, швидкості поширення пружних хвиль та їх кореляційні зв'язки із фільтраційно-ємнісними параметрами, використовують для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки і сейсморозвідки, а також з метою розробки нових технологій інтенсифікації видобування вуглеводнів (Горовенко та ін., 2022).

Слід відзначити, що, незважаючи на значну кількість відповідних публікацій нафтогазової тематики, обсяги інформації про фільтраційно-ємнісні властивості порід-колекторів є незначними і встановлених кореляційних залежностей між фільтраційно-ємнісними параметрами для конкретних площ і утворень недостатньо для обґрунтування петрофізичної моделі. Також практично відсутні дослідження залежності фільтраційних властивостей порід від тиску і температури, що часто призводить до використання необґрунтованих залежностей для перерахунку параметрів, отриманих в атмосферних умовах, у пластові.

**Мета досліджень.** Метою даних досліджень було визначення залежностей фільтраційних параметрів порід-колекторів від тиску і температури на основі фізичного моделювання процесу протікання нафти через породу-колектор в пластових умовах.

**Об'єкт досліджень.** Пісковик дрібно-середньозернистий, за мінеральним складом поліміктовий, Розумівського нафтогазоконденсатного родовища з інтервалу 2233–2249 метрів. Фільтраційно-ємнісні властивості в атмосферних умовах виконані на 12 зразках. Фізичне моделювання пластових умов виконане на 2 зразках. Зразок Р-1 вирізаний вздовж, а зразок Р-2 – вхрест нашарування осадового матеріалу.

**Експериментальні петрофізичні дослідження** виконано у НДЛ теоретичної і прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка. Для лабораторних досліджень виготовлено і підготовлено 12 циліндричних зразків з керну свердловини (інтервал 2233–2249 м) Розумівського родовища.

Розумівське нафтогазоконденсатне родовище розташоване на території Зачепилівського району Харківської області і частково на території Карлівського району Полтавської області України. Пісковики продуктивного горизонту середнього карбону (М-1) від дрібно- до середньозернистих, за мінеральним складом поліміктові, олігоміктові, слюдисто-кварцові, від щільних до середньозцементованих, інколи горизонтальношаруваті із слюдами та вугільними залишками по нашаруванню. Під мікроскопом склад у поліміктових різновидах пісковиків – кварц, уламки порід (кварцити, кремні, аргілітові сланці, ефузиви), плагіоклази, слюди, хлорит. Зерна кварцу

слабообкатані, напівобкатані і кутасті, погано відсортовані, часто зчленовані в агрегати конформно-регенеративно. Плагіоклази серицитизовані та пелітизовані різною мірою. Акцесорні – апатит, чорні рудні мінерали, сфен, гранат. Цемент полімінеральний поровий (у міцних непрониких пісковиках – переважно порово-базальний).

Комплекс петрофізичних досліджень включав визначення: густини порід; відкритої та ефективної пористості; структури капілярного простору та абсолютної проникності. Усі лабораторні дослідження виконувались відповідно до чинних нормативних документів.

Окрім того, виконано низку експериментів з дослідження залежностей проникності пісковиків для нафти від температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов на установці високого тиску.

#### Методи

Об'ємна густина досліджених порід у сухому стані визначалась шляхом зважування та вимірювання геометричних розмірів спеціальних лабораторних зразків циліндричної форми, а в насиченому стані (насичувалися нафтою) – застосовувався метод гідростатичного зважування за стандартною методикою попередньо насичених зразків (Дортман, 1992 а, б; Інструкція..., 1977; Тиаб, & Доналдсон, 2009). Для визначення ваги зразків використовувались цифрові аналітичні ваги WPS 360/c/2 (точність  $\pm 0,001$  г).

Коефіцієнт відкритої пористості визначався газоволюметричним способом та методом гідростатичного зважування згідно із стандартною методикою.

Капілярметричні дослідження виконувалися шляхом центрифугування зразків порід за допомогою центрифуги ОС-6М (Породи..., 1985; Рудько, 2005). Обертова швидкість ротора центрифуги змінювалась від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, водночас тиск витіснення змінювався від 0,03 до 1 МПа.

Для встановлення кореляційних залежностей фільтраційних параметрів порід від температури і тиску виконано комплекс петрофізичних досліджень із фізичним моделюванням пластових умов. При цьому застосовувалась спеціалізована установка високого тиску ВСЦМ-1000, розроблена в НДЛ теоретичної і прикладної геофізики.

#### Результати

Висвітлено результати виконаних комплексних лабораторних досліджень, що виконувались як в атмосферних умовах (12 зразків), так і при моделюванні пластових умов (2 зразки). Відомості про межі змін та середні значення петрофізичних параметрів досліджених пісковиків та кореляційні залежності наведено у відповідних таблицях та на графіках.

#### Аналіз даних лабораторних досліджень в атмосферних умовах

**Густина.** За результатами лабораторних визначень густини встановлено, що цей параметр для сухих пісковиків змінюється від 2089 кг/м<sup>3</sup> до 2124 кг/м<sup>3</sup> за середнього значення 2109 кг/м<sup>3</sup>. Густина порід, насичених нафтою, варіює в межах від 2485 кг/м<sup>3</sup> до 2499 кг/м<sup>3</sup> за середнього значення 2491 кг/м<sup>3</sup>. Уявна мінералогічна густина пісковиків змінюється від 2768 до 2779 кг/м<sup>3</sup> за середнього значення 2772 кг/м<sup>3</sup> (табл. 1).

Таблиця 1

| Межі змін і середні значення густинних параметрів порід |                    |                                   |                                            |                                                |
|---------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|
| Порода                                                  | Значення параметра | Густина (сухі), кг/м <sup>3</sup> | Густина (насих. нафтою), кг/м <sup>3</sup> | Уявна густина мінералогічна, кг/м <sup>3</sup> |
| Пісковики                                               | мін.               | 2089                              | 2485                                       | 2768                                           |
|                                                         | макс.              | 2124                              | 2499                                       | 2779                                           |
|                                                         | сер.               | 2109                              | 2491                                       | 2772                                           |



**Пористість.** Пористість породи – це властивість її вміщувати флюїди (нафту, газ і воду) і є важливим параметром, який визначає ємність колектора. Виділяють загальну, відкриту та ефективну пористість (Дортман, 1992 а, б; Інструкція ..., 1977; Тиаб и Доналдсон, 2009). Коефіцієнт пористості один із головних параметрів, що характеризує пустотний простір породи і для кожного типу флюїду визначає його об'єм. Також важливими властивостями порід-колекторів є структура їх пустотного

простору та вміст залишкової води, а також звивистість порових каналів. Лабораторні визначення цих параметрів дає змогу отримати інформацію про катагенетичні і діагенетичні процеси та про механізми, які діяли під час транспортування й відкладення матеріалу, ущільнення й деформації осадових порід (Тиаб и Доналдсон, 2009). Відомості про межі змін та середні значення коефіцієнта пористості порід, залежно від їх виду наведено в табл. 2.

Таблиця 2

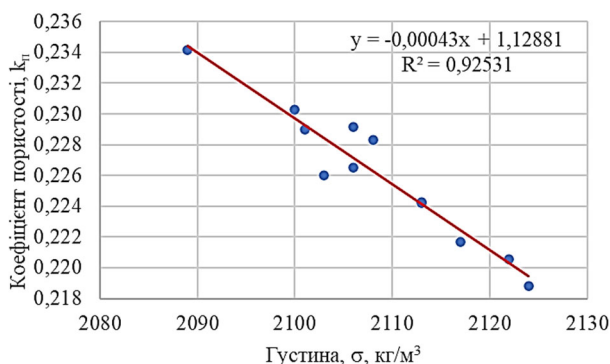
| Межі змін і середні значення ємнісних параметрів порід |                    |                                        |               |                                              |                                                 |
|--------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------|---------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Порода                                                 | Значення параметра | Коефіцієнт відкритої пористості, $k_p$ |               | Коефіцієнт ефективної пористості, $k_{п,еф}$ | Коефіцієнт проникності $k_{пр}$ , $\text{фм}^2$ |
|                                                        |                    | насич. азотом                          | насич. нафтою |                                              |                                                 |
| Пісковики                                              | мін.               | 0,219                                  | 0,146         | 0,054                                        | 6,864                                           |
|                                                        | макс.              | 0,234                                  | 0,151         | 0,113                                        | 17,280                                          |
|                                                        | сер.               | 0,226                                  | 0,148         | 0,082                                        | 12,923                                          |

Значення коефіцієнта відкритої пористості пісковиків, визначеного газоволюметричним способом, змінюються від 0,219 до 0,234 за його середнього значення 0,226. Коефіцієнт відкритої пористості пісковиків, визначений насиченням нафтою змінюється від 0,146 до 0,151 за його середнього значення 0,148.

Аналіз лабораторних даних показує, що середнє значення коефіцієнта пористості, визначеного гідростатичним

методом при насиченні досліджених порід нафтою, на 35 % нижче, ніж газоволюметричним способом. Це пояснюється вищою проникністю азоту в субкапілярні пори порівняно з нафтою.

Встановлена кореляційна залежність між густиною і коефіцієнтом пористості пісковиків, визначеним газоволюметричним методом (рис. 1).

Рис. 1. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід ( $k_p$ ), визначеного методом насичення азотом, від густини ( $\sigma$ )

**Структура пустотного простору пісковиків.** Структура пустотного простору осадових порід значною мірою визначається формою й окатаністю зерен, їх розмірами, сортуванням, орієнтуванням і типом упаковки, а також хімічним складом (Дортман, 1992 а, б; Інструкція ..., 1977; Тиаб и Доналдсон, 2009). Структура пустотного простору порід визначалась способом центрифугування їх зразків за допомогою центрифуги ОС-6М. Аналіз кривих капілярного тиску (ККТ), отриманих за результатами центрифугування, дозволив визначити коефіцієнти залишкового нафтонасичення ( $k_{зн}$ ) та структуру пустотного простору досліджених пісковиків. Відомості про структуру пустотного простору і коефіцієнти залишкового нафтонасичення наведено в табл. 3.

На рис. 2 наведено криві капілярного тиску досліджених порід.

За результатами аналізу кривих капілярного тиску (ККТ) встановлено, що коефіцієнт залишкового нафтонасичення пісковиків змінюється від 0,226 до 0,635 за його середнього значення 0,445 (табл. 3). З використанням коефіцієнта залишкового нафтонасичення визначений коефіцієнт ефективної пористості (табл. 2), який змінюється від 0,054 до 0,113 за його середнього значення 0,082.

Встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтом ефективної пористості порід ( $k_{п,еф}$ ) і коефіцієнтом залишкового нафтонасичення ( $k_{зн}$ ) та коефіцієнтом пористості ( $k_p$ ), які мають лінійний характер:

$$k_{п,еф} = -6,52373 \cdot k_{зн} - 1,37947, \text{ при } R^2 = 0,952;$$

$$k_{п,еф} = -0,14425 \cdot k_{зн} + 0,14598, \text{ при } R^2 = 0,999.$$

Графіки цих залежностей наведено на рис. 4а та 4б.

Таблиця 3

| Межі змін і середні значення параметрів пустотного простору порід |                    |              |           |              |                                                 |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------|-----------|--------------|-------------------------------------------------|
| Порода                                                            | Значення параметра | Вміст пор, % |           |              | Коефіцієнт залишкового нафтонасичення, $k_{зн}$ |
|                                                                   |                    | надкапілярні | капілярні | субкапілярні |                                                 |
| Пісковики                                                         | мін.               | 13,4         | 13,8      | 22,6         | 0,226                                           |
|                                                                   | макс.              | 58,7         | 23,4      | 63,5         | 0,635                                           |
|                                                                   | сер.               | 35,8         | 19,8      | 44,5         | 0,445                                           |

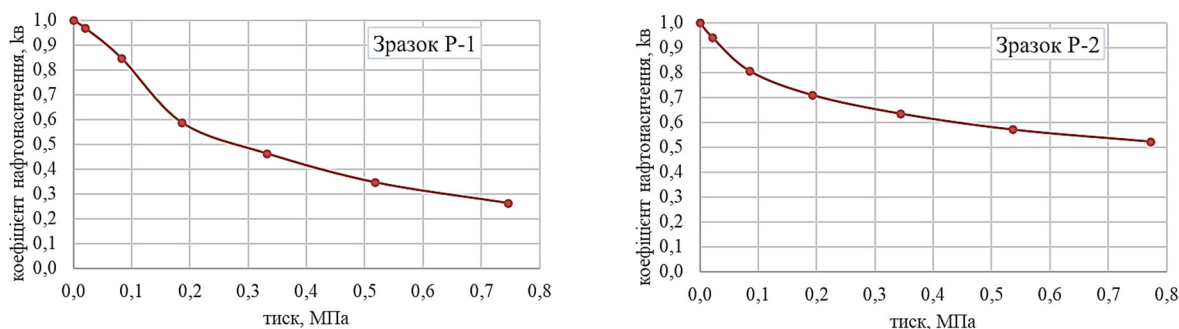
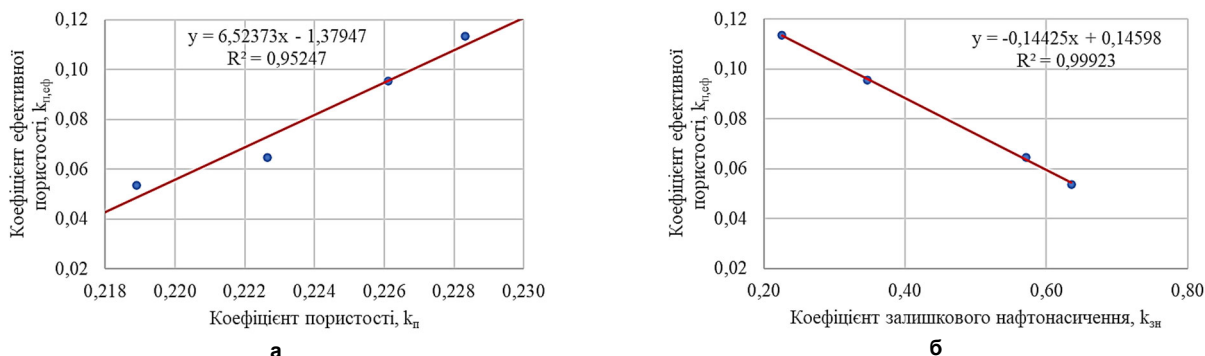


Рис. 3. Типові криві капілярного тиску досліджених пісковиків

Рис. 4. Залежність коефіцієнта ефективної пористості пісковиків ( $k_{п,еф}$ ) від коефіцієнта пористості порід (а) та коефіцієнта залишкового нафтонасичення (б)

За результатами капілярометричних досліджень виконано оцінку структури пустотного простору досліджених порід за діаметром капілярів. Розподіл пустотного простору порід на субкапілярні (діаметр  $<0,2$  мкм), капілярні (діаметр  $0,2-3$  мкм) та надкапілярні (діаметр  $3-100$  мкм) пори (Нестеренко, 2010) наведено в табл. 3. Слід відзначити, що субкапілярні пори участі у фільтрації флюїдів не беруть і зазвичай заповнені залишковою водою або нафтою. Натомість флюїди, зосереджені у надкапілярних і капілярних порових каналах, можуть брати участь у фільтраційних процесах. У результаті лабораторних капілярометричних досліджень встановлено, що поровий простір досліджених пісковиків має таку структуру: вміст надкапілярних пор змінюється від 13,4 до 58,7 % за середнього значення 35,8 %; вміст капілярних пор – від 13,8 до 23,4 % за середнього значення 19,8 %; вміст субкапілярних пор – від 22,6 до 63,5 % за середнього значення 44,5 %.

Таким чином, за структурою пустотного простору досліджені пісковики мають середні фільтраційні властивості.

**Проникність.** Це властивість гірських порід, що характеризує їх здатність пропускати флюїди, тобто визначає швидкість руху флюїду і впливає на вибір оптимальної технології видобутку. Проникність порід контролюється розміром зерен породи, їх формою та просторовим розподілом за розмірами, а також їхньою упаковкою, ступенем глинистості, консолідації і цементації. На проникність також суттєво впливає тип глинистого або іншого цементувального матеріалу між піщаними зернами, особливо у разі присутності води. Деякі глинисті мінерали, зокрема монтморилоніт і смектит, розбухають у воді і можуть частково або повністю закупорювати пустотний простір (Тиаб, & Доналдсон, 2009; Породи..., 1985).

Здатність породи пропускати через себе флюїди характеризується коефіцієнтом проникності  $k_{пр}$ . У випадку, коли порода на 100 % насичена одним флюїдом

(фазою), таким як газ, нафта або вода, проникність називається абсолютною для даного флюїду. У разі присутності у породі більше одного флюїду, проникність для кожного з них є фазовою, при цьому коефіцієнти проникності  $k_{прг}$ ,  $k_{прн}$ ,  $k_{прв}$  характеризують ефективну фазову проникність для газу, нафти й води відповідно. В процесі руху по пустотних каналах пластові флюїди взаємодіють між собою, гальмуючи один одного, тому сума ефективної проникності всіх трьох фаз завжди менша від абсолютної проникності.

Згідно з літературними даними, проникність порід-колекторів нафти і газу змінюється в діапазоні від  $0,1$  до  $1000$  фм<sup>2</sup>, інколи й більше. Клас колектора зумовлюється його проникністю, що поділяється на: низьку –  $k_{пр} < 1$  фм<sup>2</sup>, задовільну –  $k_{пр} = 1-10$  фм<sup>2</sup>, середню –  $k_{пр} = 10-50$  фм<sup>2</sup>, високу –  $k_{пр} = 50-250$  фм<sup>2</sup> і дуже високу –  $k_{пр} > 250$  фм<sup>2</sup> (Тиаб, & Доналдсон, 2009). Породи, що мають проникність, нижчу за  $1$  фм<sup>2</sup>, вважаються ущільненими. Низька проникність властива алевrolітам, аргілітам, ущільненим газоносним пісковикам та матриці вапняків.

Коефіцієнт проникності пісковиків визначався методом стаціонарної фільтрації азоту за допомогою спеціально розробленої установки (Породи..., 1985). Середня відносна похибка визначень коефіцієнта проникності становила 2,1 %. У табл. 2 наведено межі змін і середні значення коефіцієнта проникності досліджених пісковиків.

Аналіз результатів лабораторних досліджень коефіцієнта проникності пісковиків показав, що цей параметр змінюється від 6,864 до 17,280 фм<sup>2</sup> за його середнього значення 12,923 фм<sup>2</sup>.

Встановлено кореляційну залежність між коефіцієнтом проникності порід ( $k_{пр}$ ) і коефіцієнтом пористості ( $k_p$ ):  $k_{пр} = 698,5066 \cdot k_p - 144,99287$ , при  $R^2 = 0,714$ . Графік цієї залежності наведено на рис. 5.

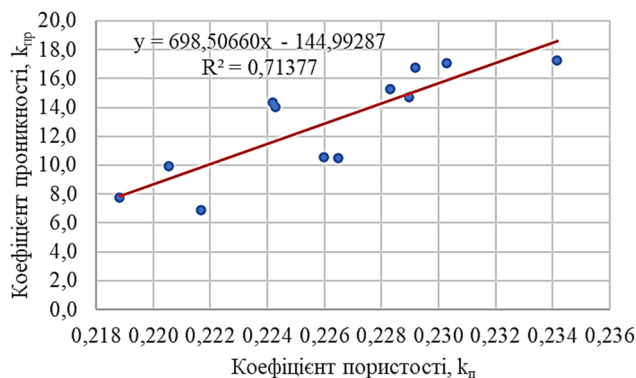


Рис. 5. Залежність коефіцієнта відкритої пористості порід ( $k_n$ ), визначеного методом насичення азотом, від густини ( $\sigma$ )

**Аналіз даних лабораторних досліджень у пластових умовах.** Фізичне моделювання пластових умов виконано з використанням установки високого тиску ВСЦМ-1000. Як вже зазначалось, проведено низку експериментів з дослідження залежностей проникності пісковиків для нафти від температури і тиску при фізичному моделюванні пластових умов.

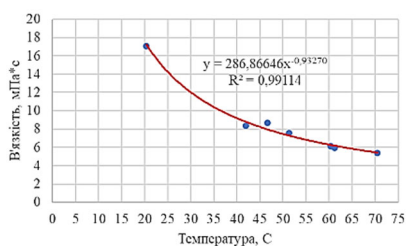
Щоб виконати заплановані лабораторні експерименти, потрібно було визначити характер зміни в'язкості нафти в різних пластових умовах (температура і тиск – РТ-умови). Для цього розробили спеціальний еталон та

провели експерименти з вивчення залежності в'язкості нафти від температури і тиску. Гірський тиск ( $P_{гip}$ ) при фізичному моделюванні пластових умов становив 400 бар. За допомогою гідравлічної станції на вході еталона створювався тиск ( $P_{вхiд}$ ), відповідно,  $P_{вхiд}=200, 260$  та  $300$  бар. На виході еталона за допомогою клапана тиску, тиск ( $P_{вихiд}$ ) підтримувався на 20 бар менший, ніж на вході, і сягав –  $P_{вихiд}=180, 240$  та  $280$  бар. Дослідження провели за температур від 40 до 70 °С.

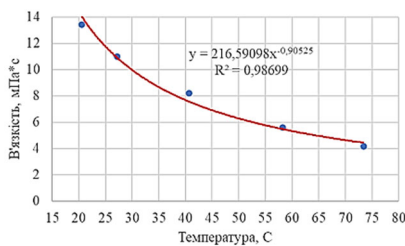
Результати цих досліджень наведено в табл. 4 та на рис. 6 а, б, в.

Таблиця 4

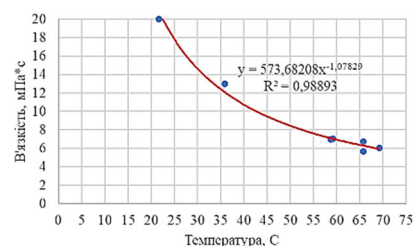
| Результати визначення в'язкості нафти за пластових умов |                 |                    |                    |                     |                  |
|---------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| №                                                       | Температура, °С | Гірський тиск, бар | Тиск на вході, бар | Тиск на виході, бар | В'язкість, мПа·с |
| 1                                                       | 20,4            | 400                | 200                | 180                 | 17,055           |
| 2                                                       | 41,9            | 400                | 200                | 180                 | 8,373            |
| 3                                                       | 46,6            | 400                | 200                | 180                 | 8,667            |
| 4                                                       | 51,4            | 400                | 200                | 180                 | 7,575            |
| 5                                                       | 60,4            | 400                | 200                | 180                 | 6,147            |
| 6                                                       | 61,2            | 400                | 200                | 180                 | 5,918            |
| 7                                                       | 70,5            | 400                | 200                | 180                 | 5,406            |
| 8                                                       | 20,5            | 400                | 260                | 240                 | 13,413           |
| 9                                                       | 27,2            | 400                | 260                | 240                 | 10,980           |
| 10                                                      | 40,7            | 400                | 260                | 240                 | 8,193            |
| 11                                                      | 58,2            | 400                | 260                | 240                 | 5,589            |
| 12                                                      | 73,4            | 400                | 260                | 240                 | 4,164            |
| 13                                                      | 21,7            | 400                | 300                | 280                 | 19,996           |
| 14                                                      | 35,9            | 400                | 300                | 280                 | 13,010           |
| 15                                                      | 58,7            | 400                | 300                | 280                 | 6,987            |
| 16                                                      | 59,2            | 400                | 300                | 280                 | 7,037            |
| 17                                                      | 65,7            | 400                | 300                | 280                 | 6,718            |
| 18                                                      | 65,8            | 400                | 300                | 280                 | 5,673            |
| 19                                                      | 69,2            | 400                | 300                | 280                 | 6,055            |



а)



б)



в)

Рис. 6. Залежність в'язкості нафти від температури в пластових умовах:

а)  $P_{гip}=400$  бар;  $P_{вхiд}=200$  бар;  $P_{вихiд}=180$  бар; б)  $P_{гip}=400$  бар;  $P_{вхiд}=260$  бар;  $P_{вихiд}=240$  бар;

в)  $P_{гip}=400$  бар;  $P_{вхiд}=300$  бар;  $P_{вихiд}=280$  бар

Аналіз рис. 6 а, б, в показує, що залежність в'язкості нафти від температури за пластових умов апроксимується степеневою функцією для даного інтервалу температур.

Виконано також лабораторні експерименти з визначення коефіцієнта проникності пісковиків (циліндричні зразки Р-1 і Р-2) з фізичним моделюванням пластових умов ( $P_{гip}=400$  бар,  $P_{вхiд}=200, 260$  та  $300$  бар, відповідно,



$P_{\text{вихід}}=180, 240$  та  $280$  бар; температура змінювалась від  $40$  до  $80$  °C). Зразок Р-1 вирізаний вздовж напластування, а зразок Р-2 – вхрест напластування і відмічаються найвищими фільтраційно-ємнісними параметрами з поміж доступних для досліджень. Під час цих досліджень визначались: об'єм прокачаної нафти та час, за який цей об'єм пройшов через зразки. Потім визначався розхід (потік) нафти через зразки в  $\text{см}^3$  за годину (або  $\text{см}^3$

за секунду). З використанням результатів визначення в'язкості нафти за допомогою еталона за різних РТ-умов визначався коефіцієнт проникності для нафти. Вимірювання виконувались на екстрагованих зразках (2023 р.). На насичених нафтою і витриманих (~ 5–6 місяців) у нафті зразках виконано повторні вимірювання.

За лабораторними дослідженнями зразка Р-1 отримано такі результати (табл. 5, рис. 7 а, б, в).

Таблиця 5

Результати визначення коефіцієнта проникності по нафті зразка Р-1

| №  | Температура, °C | Гірський тиск, бар | Тиск на вході, бар | Тиск на виході, бар | Коефіцієнт проникності, $\text{фм}^2$ |                               |
|----|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------------|
|    |                 |                    |                    |                     | Насичений зразок, 2024 р.             | Екстрагований зразок, 2023 р. |
| 1  | 39              | 400                | 200                | 180                 | 0,0324                                | 0,0485                        |
| 2  | 60              | 400                | 200                | 180                 | 0,0124                                | 0,0303                        |
| 3  | 70              | 400                | 200                | 180                 | 0,0095                                |                               |
| 4  | 80              | 400                | 200                | 180                 |                                       | 0,0046                        |
| 5  | 40              | 400                | 260                | 240                 | 0,0199                                | 0,0314                        |
| 6  | 60              | 400                | 260                | 240                 | 0,0068                                | 0,0199                        |
| 7  | 70              | 400                | 260                | 240                 | 0,0053                                |                               |
| 8  | 80              | 400                | 260                | 240                 |                                       | 0,0031                        |
| 9  | 39,3            | 400                | 300                | 280                 | 0,0266                                |                               |
| 10 | 40              | 400                | 300                | 280                 |                                       | 0,0272                        |
| 11 | 59,8            | 400                | 300                | 280                 | 0,0069                                |                               |
| 12 | 60              | 400                | 300                | 280                 |                                       | 0,0189                        |
| 13 | 70              | 400                | 300                | 280                 | 0,0042                                |                               |
| 14 | 80              | 400                | 300                | 280                 |                                       | 0,003671                      |

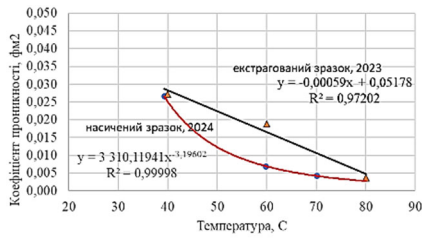
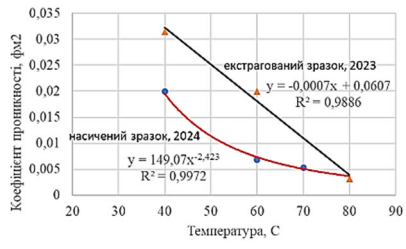
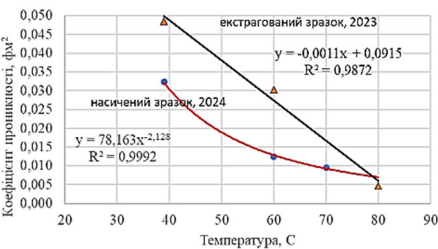


Рис. 7. Залежність коефіцієнта проникності зразка Р-1 від температури для нафти за пластових умов:

а)  $P_{\text{гирс}}=400$  бар;  $P_{\text{вихід}}=200$  бар;  $P_{\text{вихід}}=180$  бар; б)  $P_{\text{гирс}}=400$  бар;  $P_{\text{вихід}}=260$  бар;  $P_{\text{вихід}}=240$  бар; в)  $P_{\text{гирс}}=400$  бар;  $P_{\text{вихід}}=300$  бар;  $P_{\text{вихід}}=280$  бар

Аналіз табл. 5 та рис. 7 а, б, в показує, що коефіцієнт проникності ( $K_{\text{пр}}$ ) зменшується з ростом температури. На рис. 7 а, б, в трикутниками зображено дані, отримані при прокачуванні нафти через екстрагований зразок Р-1 в 2023 р., а точками – дані, отримані при прокачуванні нафти через насичений нафтою і герметизований той же зразок в рамках виконаних досліджень у 2024 р. Залежність коефіцієнта проникності від температури для екстрагованого зразка апроксимується лінійною функцією, а зразка насиченого нафтою – степеневою функцією. Як видно з рисунка, значення  $K_{\text{пр}}$  екстрагованого зразка в інтервалі

температур  $40\text{--}70$  °C, значно вищі, ніж насиченого, а за температури  $80$  °C, практично зрівнюються.

Вважаємо, що зниження коефіцієнта проникності зразка зі збільшенням температури, при тому, що в'язкість нафти також знижується, можна пояснити тепловим розширенням мінералів, які складають породу, і таким чином звужуються надкапілярні пори, а також блокується частина капілярних пор, шляхом переходу їх у субкапілярні (непроникні). Тобто у зразку відбувається зміна структури капілярного простору.

За лабораторними дослідженнями зразка Р-2 отримано такі результати (табл. 6, рис. 8 а, б, в).

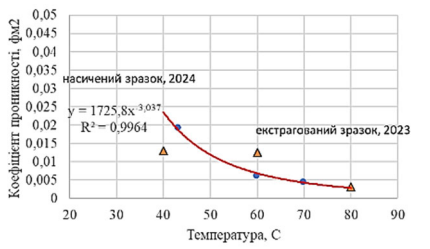
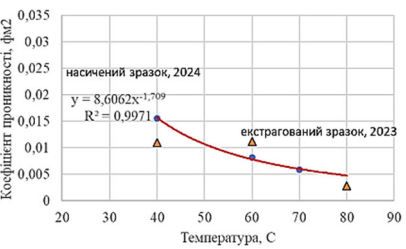
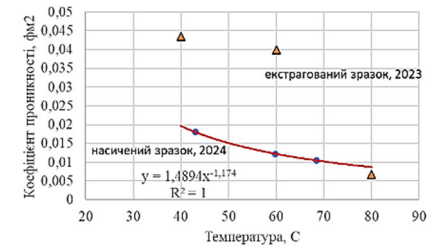


Рис. 8. Залежність коефіцієнта проникності зразка Р-2 від температури для нафти за пластових умов:

а)  $P_{\text{гирс}}=400$  бар;  $P_{\text{вихід}}=200$  бар;  $P_{\text{вихід}}=180$  бар; б)  $P_{\text{гирс}}=400$  бар;  $P_{\text{вихід}}=260$  бар;  $P_{\text{вихід}}=240$  бар; в)  $P_{\text{гирс}}=400$  бар;  $P_{\text{вихід}}=300$  бар;  $P_{\text{вихід}}=280$  бар

Таблиця 6

Результати визначення коефіцієнта проникності по нафті зразка Р-2.

| №  | Температура, °С | Гірський тиск, бар | Тиск на вході, бар | Тиск на виході, бар | Коефіцієнт проникності, фм <sup>2</sup> |                               |
|----|-----------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
|    |                 |                    |                    |                     | Насичений зразок, 2024 р.               | Екстрагований зразок, 2023 р. |
| 1  | 40              | 400                | 200                | 180                 |                                         | 0,043551                      |
| 2  | 43              | 400                | 200                | 180                 | 0,01803                                 |                               |
| 3  | 59,8            | 400                | 200                | 180                 | 0,012244                                |                               |
| 4  | 60              | 400                | 200                | 180                 |                                         | 0,039929                      |
| 5  | 68,4            | 400                | 200                | 180                 | 0,010457                                |                               |
| 6  | 80              | 400                | 200                | 180                 |                                         | 0,006734                      |
| 7  | 40              | 400                | 260                | 240                 | 0,015538                                | 0,011016                      |
| 8  | 60              | 400                | 260                | 240                 | 0,00818                                 | 0,011266                      |
| 9  | 70              | 400                | 260                | 240                 | 0,005862                                |                               |
| 10 | 80              | 400                | 260                | 240                 |                                         | 0,002824                      |
| 11 | 40              | 400                | 300                | 280                 |                                         | 0,012952                      |
| 12 | 43              | 400                | 300                | 280                 | 0,019462                                |                               |
| 13 | 59,8            | 400                | 300                | 280                 | 0,006363                                |                               |
| 14 | 60              | 400                | 300                | 280                 |                                         | 0,0126                        |
| 15 | 69,8            | 400                | 300                | 280                 | 0,004615                                |                               |
| 16 | 80              | 400                | 300                | 280                 |                                         | 0,003131                      |

Аналіз табл. 6 та рис. 8 а, б, в показує, що коефіцієнт проникності зменшується з ростом температури. На рис. 8 а, б, в трикутниками зображено дані, отримані при прокачуванні нафти через екстрагований зразок Р-2 в 2023 р., а точками – дані, отримані при прокачуванні нафти через насичений нафтою і герметизований той же зразок в рамках виконаних досліджень у 2024 р. Залежність коефіцієнта проникності від температури для зразка насиченого нафтою з наступною герметизацією (~5–6 місяців), апроксимується степеневою функцією. Характер зміни проникності від температури аналогічний зразку Р-1, однак з меншою амплітудою, що може пояснюватись структурою пустотного простору (вирізаний перпендикулярно нашаруванню). Як видно з рисунків 8 а, б, в, значення  $k_{пр}$  екстрагованого зразка за температури 60 °С, вище, ніж насиченого, а за температури 80 °С, практично зрівнюється.

#### Дискусія і висновки

Завдяки лабораторним дослідженням встановлено в'язкість нафти, а також визначено коефіцієнт проникності зразків Р-1 та Р-2 в пластових умовах за різних температур і тисків.

Спостерігається анізотропія фільтраційно-ємнісних властивостей пісковиків уздовж і вхрест нашарування осадового матеріалу.

В'язкість нафти в пластових умовах зменшується у разі збільшення температури. Залежність в'язкості нафти від температури за пластових умов апроксимується степеневою функцією.

Залежність коефіцієнта проникності від температури для зразків Р-1 та Р-2, насичених нафтою з наступною герметизацією (~5–6 місяців), апроксимується степеневою функцією.

Зниження коефіцієнтів проникності зразків Р-1 та Р-2 в пластових умовах зі збільшенням температури, при тому, що в'язкість нафти також знижується, можна пояснити тепловим розширенням мінералів, які складають породу, і таким чином звужують надкапілярні пори і блокують частину капілярних пор, переводячи їх в субкапілярні (непроникні). Тобто у зразках відбувається зміна структури капілярного простору.

На наш погляд, зразки Р-1, Р-2 із "закольматованим" поровим простором для подальших досліджень слід "промивати" розчином для інтенсифікації продуктивних горизонтів свердловин. Після "промивки" зразки пісковика знову прокачати нафтою з метою оцінки ефективності

розчину для інтенсифікації продуктивних горизонтів свердловин у різних РТ-умовах.

Отримані дані і кореляційні залежності можуть бути використані при інтерпретації матеріалів геофізичних досліджень свердловин та моделюванні фільтраційно-ємнісних параметрів порід у пластових умовах.

**Внесок авторів:** Сергій Вихва – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування); Дмитро Венгровіч – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування); Віктор Онишук – методологія, аналіз і обробка даних, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Іван Онишук – валідація даних, аналіз і обробка даних, методологія, написання (перегляд і редагування); Олександр Шабатура – програмне забезпечення, формальний аналіз; Анна Даценко – пошук і підбір зразків порід-колекторів та нафти з родовищ України.

**Подяки, джерела фінансування.** Автори висловлюють щирі подяку ст. лаборанту Цуману В.С. за його активну й високопрофесійну участь у підготовці зразків у лабораторних дослідженнях.

#### Список використаних джерел

- Вихва, С. А., Михайлов, В. А., Онишук, Д. І., & Онишук, І. І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3(47), 17–25. <https://www.geology.com.ua/wp-content/uploads/2015/04/4.pdf>
- Вихва, С. А., Михайлов, В. А., Онишук, Д. І., & Онишук, І. І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163>
- Вихва, С. А., Михайлов, В. А., & Онишук, І. І. (2017). Петрофізичні особливості порід майкопської серії Кримсько-Чорноморського регіону. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20. <https://doi.org/10.17721/17282713.79.02>
- Вихва, С. А., Онишук, В. І., Онишук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(83), 30–37. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.04>
- Вихва, С. А., Орлюк, М. І., Онишук, В. І., Онишук, І. І., Друкаренко, В. В., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41(4), 145–160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380>
- Вихва, С. А., Онишук, В. І., Онишук, І. І., Рева, М. В., Шабатура, О. В., & Олійник, О. В. (2020). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04>
- Вихва, С. А., Онишук, В. І., Онишук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2021). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених порід північної приборової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(94), 37–45. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04>

- Вишва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2022a). Колекторські властивості глибокозанурених ущільнених порід карбону центрального грабена ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(96), 11–19. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02>
- Вишва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Рева, М. В., & Шабатура, О. В. (2022b). Фільтраційно-ємнісні параметри ущільнених теригених порід кембрію східного схилу Львівського палеозойського прогину. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(98), 33–41. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.04>
- Горovenko, A. P., Vengrovich, D. B., & Sheremet, G. P. (2022). Фільтрація вуглеводнів кернами пористого середовища в полі акустичних коливань. *Геотехнічний журнал*, 7, 17–22. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267556>
- Дортман, Н. Б. (1992a). *Петрофізика. Справочник*. Ч. 1. Недра.
- Дортман, Н. Б. (1992b). *Петрофізика. Справочник*. Ч. 2. Недра.
- ДСТУ 41-00032626-00-025-2000. (2001). Коефіцієнт залишкового водонасичення гірських порід. Методика виконання вимірювань методом центрифугування зразків. Мінекоресурсів України.
- 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>
- 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>
- Маслов, Б. П., Онищук, І. І., & Шинкаренко, А. В. (2017). Моделирование нелинейных вязко-пружинных властивостей теригенно-вапняковистых песчаников. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(77), 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13>
- Державний комітет ЦРП з стандартів. (1985). *Породи гірські. Метод визначення коефіцієнта абсолютної газопроникуваності при стаціонарній і нестаціонарній фільтрації*. (ГОСТ 26450.2-85). Мінгео ЦРП.
- Михайлов, В. А., Вишва, С. А., & Загнітко, В. М. та ін. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження*. Книга IV. ВПЦ "Київський університет".
- Михайлов, В. А., Карпенко, О. М., Курило, М. М. та ін. (2018). *Горючі корисні копалини України та їхня геолого-економічна оцінка*. ВПЦ "Київський університет".
- Нестеренко, М. Ю. (2010). *Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів*. УкрДГРІ.
- Орлюк, М. І., & Пашкевич, І. К. (2011). Магнитная характеристика и разломная тектоника земной коры Шебелинской группы газовых месторождений как составная часть комплексных поисковых критериев углеводородов. *Геофизический журнал*, 33(6), 136–151. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799>
- Орлюк, М. І., & Друкаренко, В. В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35(2), 127–136. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111356>
- Орлюк, М. І., & Друкаренко, В. В. (2018). Прогноз шляхів проходження та місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегменту Дніпровсько-Донецького авлакогена за геомагнітними даними. *Геофизический журнал*, 40(2), 123–140. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.12893>
- Пашкевич, І. К., Орлюк, М. І., & Лебедь, Т. В. (2014). Магнитная неоднородность, разломная тектоника консолидированной земной коры и нефтегазоносность Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геофизический журнал*, 36(1), 64–80. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v36i1.2014.116163>
- Рибалка, С., & Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості теригених порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 56–59. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>
- Рудько, Г. І. (ред.) (2005). *Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів теригених порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів*. Методичні вказівки. УкрДГРІ.
- Соболь, В., & Карпенко, О. (2021). Новая модель проникуваності теригених гранулярних колекторів на прикладі турнейських відкладів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(92), 61–66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09>
- Тиаб, Д., & Доналдсон, Э. Ч. (2009). Петрофизика: Теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. Премииум Инжиниринг.
- Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko, V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower vissean organic-rich formations in Glynko-Solohivskiy petroleum region. *Geodynamics*, 1(34), 80–96. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080>
- Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., & Solodkyi, E. (2018a). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the hlynko-solohivskiy oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2(25), 71–88. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>
- Orlyuk, M., Drukarenko, V., & Onyshchuk, I. (2018b). Physical properties of deep reservoirs of the Glynko-Solohivskiy oil and gas region. *XII Міжнародна наукова конференція "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища" 13–16 листопада 2018 р., Київ, Україна*.
- Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Bakarjeva, M. I. (2021). Geomagnetic field of the western region of Ukraine in connection with the fracture-block tectonics and hydrocarbon deposits. XX<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. 11–14 May, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521067>
- Vyzhva, S., Maslov, B., Onyshchuk, I., & Kozionova, O. (2019). Hydraulic fracture crack propagation modeling in multi-component nonelastic geological media. *Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища, 12–15 листопада 2019, Київ, Україна*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903224>
- Vyzhva, S. A., Onyshchuk, V. I., & Onyshchuk, D. I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine) *Nafta-Gaz: Rok LXXIII*, 2, 90–96. <https://doi.org/10.18668/NG.2017.02.03>

## References

- Dortman, N. B. (Ed.). (1992a). *Petrophysics. Handbook* (Vol. 1). Nedra [in Russian].
- Dortman, N. B. (Ed.). (1992b). *Petrophysics. Handbook* (Vol. 2). Nedra [in Russian].
- Gorovenko, A., Vengrovich, D., & Sheremet, H. (2022). Filtration of hydrocarbons by porous core in the field of acoustic oscillations. *Geoengineering*, 7, 7–22. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.267556>
- GSTU 41-00032626-00-025-2000. (2001). Coefficient of residual water saturation of rocks. Method of measuring measurements by centrifugation of samples. Kyiv: Ministry of Natural Resources of Ukraine, 19 p. [in Ukrainian].
- Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko, V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower vissean organic-rich formations in Glynko-Solohivskiy petroleum region. *Geodynamics*, 1(34), 80–96. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080>
- Karpenko, O., Bashkurov, G., & Karpenko, I. (2014). Geophysical data: Estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 3(66) 71–76. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.66.12> [in Ukrainian].
- 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*, 68, 49–54. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.09> [in Ukrainian].
- 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*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13> [in Ukrainian].
- Mykhailov, V. A., Vyzhva, S. A., & Zagnitko, V. M., et al. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-and-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV*. Kyiv University Publishing [in Ukrainian].
- Mykhailov, V. A., Karpenko, O. M., Kurylo, M. M. та ін. (2018). *Fossil fuels of Ukraine and their geological and economic evaluation*. Kyiv University Publishing [in Ukrainian].
- Nesterenko, M. Yu. (2010). *Petrophysical basis of the substantiating of fluid saturation of reservoir rocks*. UkrDHR [in Ukrainian].
- Orlyuk, M., & Pashkevich, I. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinka group of gas fields as a component of the complex search criteria for hydrocarbons. *Geophysical journal*, 33(6), 136–151. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116799> [in Russian].
- 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. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v35i2.2013.111356> [in Russian].
- Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I. (2018a). Physical properties of deep reservoirs of the Glynko-Solohivskiy oil and gas region. *XII International Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment", November 13–16, Kyiv, Ukraine*. <http://doi.org/10.3997/2214-4609.201803178>
- Orlyuk, M. I., & Drukarenko, V. V. (2018). Prediction of pathways and places of accumulation for hydrocarbons of the Cherniv segment of the Dnieper-Donets aulacogene in relation to magnetic heterogeneity. *Geophysical journal*, 40(2), 123–140. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i2.2018.12893> [in Ukrainian].
- Orlyuk, M., Drukarenko, V., Onyshchuk, I., & Solodkyi, E. (2018b). The association of physical properties of deep reservoirs with the geomagnetic field and fault-block tectonics in the Hlynko-Solohivskiy oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2(25), 71–88. <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>
- Orlyuk, M. I., Marchenko, A. V., & Bakarjeva, M. I. (2021). Geomagnetic field of the western region of Ukraine in connection with the fracture-block tectonics and hydrocarbon deposits/XX<sup>th</sup> International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. 11–14 May, Kyiv, Ukraine. Paper 21067-ENG. Conference CD-ROM Proceedings. PP.186–192. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521067>
- Paskevich, 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 avlaogen. *Geophysical journal*, 36(1), 64–80. <https://journals.uran.ua/geofizicheskij/article/view/116150/110237> [in Russian].



Rudko, G.I. (ed.) (2005). Substantiating of the conditioning data of the reservoir parameters of terrigenous reservoirs for calculation of hydrocarbon reserves. Methodology guidelines. Kyiv-Lviv: UkrDHRI.

Rybalka, S., & Karpenko, O. (2016). Central part of the Dnieper-Donets Basin: Reservoir properties of deep-laid terrigenous rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 1(72), 56–59. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08> [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. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09> [in Ukrainian].

Tiab, D., & Donaldson, E. C. (2009). *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport (2th Edition)*. (M.D. Uglov, Trans.). Premium Engineering. (Original work published 2004) [in Russian].

Vyzhva, S. A., Mykhailov, V. A., Onyshchuk, D. I., & Onyshchuk, I. I. (2013). Petrophysical parameters of unconventional types of reservoir rocks from southern oil-and-gas region. *Geoinformatics*, 3(47), 17–25. <https://www.geology.com.ua/wp-content/uploads/2015/04/4.pdf> [in Ukrainian].

Vyzhva, S. A., Mykhailov, V. A., & Onyshchuk, I. I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donets depression promising for shale gas. *Geophysical journal*, 36(2), 145–157. <https://journals.uran.ua/geofizicheskiy/article/view/116163/110243> [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Mykhailov, V., & Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of maikop series of the Crimean-black sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 79, 12–20. <https://doi.org/10.17721/17282713.79.02> [in Russian].

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

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Reva, M., & Shabatura, O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4(83), 30–37. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.83.04> [in Ukrainian].

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., & Shabatura, O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the

Visean stage (Lokhvytsky zone of the Dnieper-Donets Depression). *Geophysical journal*, 41(4), 145–160. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380> [in Ukrainian].

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

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

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

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

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

USSR State Committee on Standards. (1985). The rocks. Methods for determination of reservoir properties. Method for determination of absolute permeability coefficient under stationary and non-stationary filtration (GOST 26450.2–85). Mingeo USSR [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 17.03.25

Прорецензовано / Revised: 25.03.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Serhii VYZHVA<sup>1</sup>, DSc (Geol.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-4091-6649

e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Dmytro VENGROVICH<sup>2</sup>, PhD (Phys.-Math.)

ORCID ID: 0000-0002-1901-5697

e-mail: vengrovich@igph.kiev.ua

Viktor ONYSHCHUK<sup>1</sup>, PhD (Geol.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-2301-2202

e-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua

Ivan ONYSHCHUK<sup>1</sup>, PhD (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0009-0004-0186-7578

e-mail: ivan.onyshchuk@knu.ua

Anna DATSENKO<sup>2</sup>, engineer

e-mail: annadatsenko290490@gmail.com

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## PHYSICAL MODELING OF THE PROCESS OF OIL FLOW THROUGH THE RESERVOIR SANDSTONE ROCK SAMPLES IN THE RESERVOIR CONDITIONS (ROZUMIVSKE GAS CONDENSATE FIELD)

**Background.** In the article the results of the physical modeling of oil flow through the reservoir rocks are described. In petrophysical laboratory sandstones of Rozumivske gas condensate field were studied. The aim of the research was to probe into petrophysical parameters of core samples of sandstones and the physical modeling of oil flow through them in reservoir conditions.

**Methods.** Standard methods were performed to determine petrophysical parameters (density, porosity, the structure of void space, permeability) of sandstone samples in atmospheric conditions. The high-pressure installation was applied for physical modeling of the process of oil flow through the sandstone samples.

**Results.** The reservoir (flow) properties of sandstone samples in atmospheric conditions and in the physical modeling of reservoir conditions are investigated. The values of the reservoir parameters of the studied rocks and their comparison are given. The structure of the void space of rocks and its analysis was evaluated. The results of studies of permeability of rocks for oil in different pressure-temperature conditions are presented.

**Conclusions.** Via correlation analysis a number of correlations between the permeability of samples and the temperature and pressure in the reservoir conditions were established. These correlations can be used in the interpretation of geophysical studies of wells and modeling of reservoirs parameters of rocks. Then, the results of this research are going to be at the basis for studying the effect of vibro-wave and chemical methods on the filtration properties of such reservoirs in order to intensify hydrocarbon production.

**Keywords:** sandstones, reservoir parameters, density, porosity, permeability and residual water saturation factor, structure of void space, reservoir conditions, correlations.

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 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.04>

Олег ПЕТРОКУШИН, асп.

ORCID ID: 0000-0003-0953-2858

e-mail: [olehpetrokushyn22@gmail.com](mailto:olehpetrokushyn22@gmail.com)

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Ірина БЕЗРОДНА, канд. геол. наук, доц., ст. наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-6835-5276

e-mail: [irynabezrodna@knu.ua](mailto:irynabezrodna@knu.ua)

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## ІМПУЛЬСНИЙ НЕЙТРОННИЙ КАРОТАЖ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ: ВИТОКИ, СТАНОВЛЕННЯ, СУЧАСНІСТЬ

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

**Вступ.** Нині більшість нафтових і газових родовищ в Україні виснажені, що вимагає від операторських компаній в Україні постійного моніторингу рівнів насичення та руху флюїду в колекторах, оскільки це є важливою інформацією для оптимізації та планування подальших стратегій видобутку.

**Метод.** Відображено розвиток та сучасний стан імпульсного нейтронного каротажу як одного з основних методів контролю за розробкою нафтових і газових родовищ.

**Результати.** Акцентовано увагу на історії становлення ІНК починаючи з 1949 р. Подальший розвиток технології включає створення генераторів нейтронів, вдосконалення методик і апаратури, а також появу сучасних багатодетекторних приладів. Розглянуто два основні види ІНК: імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж (ІННК) і імпульсний нейтронний гамма-каротаж (ІНГК), кожен з яких має свої переваги і недоліки. Важливим етапом розвитку імпульсного нейтронного каротажу стало створення приладів *Sigma*-каротажу у 1960-х рр., які вимірюють поперечний перетин захоплення нейтронів і використовуються для оцінки нафтонасичення пластів. Значну увагу у статті приділено аналізу розвитку С/О-каротажу, що вперше застосований у 1971 р. і визначає відношення карбону до кисню для оцінки нафтонасичення порід. Розвиток багатодетекторних приладів дав змогу здійснювати дослідження через насосно-компресорні труби, що значно розширило можливості імпульсного нейтронного каротажу. Також представлено здобутки вітчизняних геофізиків з розвитку імпульсного нейтронного каротажу в Україні. Сучасні дослідження зосереджені на використанні багатодетекторних приладів і MCNP-моделей для кількісного визначення газонасиченості порід-колекторів. Використання цих приладів показало високу ефективність на родовищах Дніпровсько-Донецької западини та Передкарпатського прогину.

**Висновки.** Імпульсний нейтронний каротаж відіграє ключову роль у дослідженні та моніторингу обсаджених нафтогазових свердловин. Запропоновано подальші кроки для розвитку цієї технології в Україні, включаючи впровадження нових детекторів, збільшення кількості детекторів та використання MCNP-моделей для більш точного визначення насиченості пластів.

**Ключові слова:** імпульсний нейтронний каротаж, *Sigma*-каротаж, С/О-каротаж, MCNP-моделювання, багатодетекторні імпульсні нейтронні прилади.

### Вступ

Здійснення раціональної розробки нафтогазових родовищ вимагає систематичного контролю, який забезпечується отриманням інформації в реальному часі про характер насичення пластів, відбір нафти, газу та заміщення їх водою в пластах, що експлуатуються як на окремих ділянках, так і на конкретному родовищі загалом. Одним з основних засобів контролю над розробкою нафтових і газових родовищ є геофізичні методи дослідження обсаджених свердловин і насамперед імпульсний нейтронний каротаж, який дає змогу визначити поточний характер насичення пластів.

Історія та хронологія застосування імпульсного нейтронного каротажу для дослідження нафтогазових свердловин нерозривно пов'язані з досягненнями у сфері ядерної фізики, появою нових вимірювальних систем, розвитком електроніки та обчислювальної мікропроцесорної техніки.

Першим кроком до становлення імпульсного нейтронного каротажу стало створення генератора нейтронів, який би міг використовуватися у свердловинних умовах. У 1949 р. Р. Ферон і Дж. Тейер подали заявку на патент на генератор, який прискорював ядра дейтерію на тритієву мішень або навпаки (Fearon, & Thayer, 1955). Оскільки попередні конструкції потребували наявності безперервного вакуумного насоса, який був непрактичним у свердловині, у 1952 р. А. Юманс подав заявку на патент на перший дейтерій-тритієвий генератор, який міг використовуватися у свердловині (Youmans, 1954). Варто зазначити, що у 50–60-х рр. XX ст. роботи зі

створення імпульсних генераторів нейтронів проводилися і в колишньому СРСР. Ці досягнення стали початком практичного застосування прискорювальних дейтерій-тритієвих імпульсних джерел нейтронів у дослідженнях нафтогазових свердловин.

Подальший розвиток методу імпульсного нейтронного каротажу йшов шляхом удосконалення методик і апаратури відповідно до завдань розвідки нафтогазових родовищ, підрахунку їх запасів і контролю над розробкою родовищ.

На сьогодні розрізняють два основні різновиди імпульсного нейтронного каротажу. Це імпульсний нейтронний каротаж з вимірюванням нестаціонарного імпульсно-періодичного поля теплових нейтронів – імпульсний нейтрон-нейтронний каротаж (ІННК) та імпульсний нейтронний каротаж з вимірюванням нестаціонарних полів гамма-квантів радіаційного захоплення, непружного розсіювання або нейтронної активації – імпульсний нейтронний гамма-каротаж (ІНГК). За кордоном застосовували переважно модифікацію ІНГК, тоді як в Україні – модифікацію ІННК. Вважається, що ІНГК методично багатший, хоч його апаратура дорожча.

У даному огляді висвітлено історію розвитку, становлення та принципи сучасного застосування імпульсного нейтронного каротажу під час розробки нафтогазових родовищ у світі та в Україні.

**Початок та здобутки імпульсного нейтронного каротажу у світі. *Sigma*-каротаж.** Першим кроком у розвитку ІНГК у світі стало створення приладу,

який вимірював параметр Sigma ( $\Sigma$ ) – поперечний перетин захоплення нейтронів. Вимірювання параметра Sigma було досягнуто шляхом підрахунку гамма-квантів як функції часу із синхронізацією з циклами ввімкнення-вимкнення імпульсного генератора нейтронів. Цей прилад, представлений у 1963 р. компанією Lane-Wells, отримав назву Neutron Lifetime Log (NLL) (Youmans et al., 1964).

До основних досягнень, які забезпечили створення приладу, що вимірював параметр Sigma, можна віднести включення генератора нейтронів у конструкцію приладу, початок використання кристалічних сцинтиляційних детекторів CsI(Na) і розробку високошвидкісної електроніки, яка була потрібна для синхронізації підрахунку гамма-квантів із циклами ввімкнення-вимкнення імпульсного генератора нейтронів. У приладі NLL генератор нейтронів працював на частоті 1000 Гц, водночас під час кожного імпульсу випромінювалося 100 000 нейтронів з енергією 14 МеВ із загальною швидкістю 108 нейтронів/с (Pemper, 2020).

Перший прилад NLL реєстрував лише кількість гамма-квантів за певні періоди часу – параметри GATE1 (від 400 до 600 мкс після імпульсу нейтронів) і GATE2 (від 700 до 900 мкс після імпульсу нейтронів). Пізніше додано розрахунок поперечного перетину захоплення нейтронів, параметр Sigma ( $\Sigma$ ), оскільки його було легше інтерпретувати. Параметр Sigma розраховано з вимірів GATE1 ( $N_1$ ) і GATE2 ( $N_2$ ) за формулою

$$\Sigma = 35 \log \left( \frac{N_1}{N_2} \right).$$

На рис. 1 показано приклад каротажної діаграми, виконаної приладом NLL, де наведено порівняння кривих параметрів GATE1, GATE2 та  $\Sigma$  у комплексі з кривими самочинної поляризації (SP) та питомого електричного опору (RILD) (Fitz, 2023). З рисунка очевидно, що дуже низькі значення  $\Sigma$  і, відповідно, високі значення параметрів GATE1 та GATE2 вказують на інтервали колекторів вуглеводнів (ВВ). Дуже високі значення  $\Sigma$  і, відповідно, низькі значення параметрів GATE1 та GATE2 відповідають глинистим інтервалам. У свою чергу середні значення цих параметрів демонструють інтервали з високою пористістю, яка заповнена високомінералізованою водою.

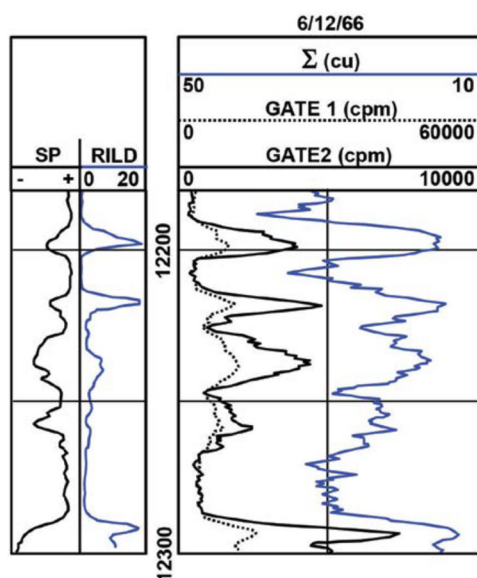


Рис. 1. Приклад каротажної діаграми приладом NLL (за Youmans et al., 1970)

Після розробки першого приладу Sigma-каротажу інші компанії нафтогазової галузі розробили схожі прилади: Thermal Neutron Decay Time (TDT) (Wahl et al., 1970), Thermal Multigate Decay (TMD) (Schultz et al., 1983; Smith et al., 1983a), Pulsed and Decay, 100 Channels (PDK-100) Tool (Randall et al., 1985; Randall et al., 1986) та Pulsed-Neutron Thermal Decay (PND) Tool (Odom et al., 1992) тощо.

Протягом наступних десятиліть відбулися значні вдосконалення приладів, які набагато спростили запис даних, підвищили чутливість приладів і точність інтерпретації даних. До них можна віднести: зменшення діаметру приладів, включення додаткових та більш чутливих сцинтиляційних детекторів (LaBr<sub>3</sub>, BGO або YAP) в конструкцію приладів, вимірювання фонові  $\Sigma$  від свердловини та ін.

Одне з найновіших вимірювань параметра  $\Sigma$  було реалізовано за допомогою приладу Raptor (Weatherford) з чотирма детекторами, де четвертий (найвіддаленіший від генератора) детектор забезпечує вимірювання  $\Sigma$  без дифузії (Schmid et al., 2018).

Першочерговим завданням цих приладів є визначення коефіцієнта нафтонасичення порід за умов високої мінералізації пластових вод. У свою чергу основними обмеженнями вимірювання  $\Sigma$  є невеликий контраст значень між газонасиченими та нафтонасиченими пластами, низька мінералізація пластових вод та низька пористість колекторів, що значно ускладнюють інтерпретацію.

**С/О-каротаж.** Передумовою до становлення С/О-каротажу, першочерговим завданням якого було обчислення відношення вмістів карбону до оксигену для визначення нафтонасичення порід-колекторів, стало створення приладу спектрального гамма-каротажу (ГК). Основою для приладів спектрального ГК була нова технологія, яка дала змогу реєструвати енергію гамма-квантів.

Першим приладом спектрального ГК, який застосували в нафтогазових свердловинах у 1969 р., став Spectralog (Lock and Hoyer, 1971; Wichman et al., 1975). Аналогові імпульси надсилалися по каротажному кабелю на поверхню, де їх оцифровували, щоб можна було створити спектр енергії в діапазоні від 0 до 3.5 МеВ. На додаток до вимірювання інтенсивності загального (інтегрального) гамма-випромінювання, спектр використовувався для виділення кількості торію ( $\text{Th}^{232}$ ), калію ( $\text{K}^{40}$ ) і урану ( $\text{U}^{238}$ ). Наступним кроком було калібрування інструменту, щоб перевести інтенсивності гамма-випромінювання в абсолютні кількості торію (ppm), калію (wt %) і урану (ppm). Енергетичні піки калію (1,461 МеВ), урану (1,765 МеВ) і торію (2,614 МеВ) були використані для стабілізації спектра як функції енергії. Калібрувальні зразки з відомою кількістю кожного елемента використовувалися як фундаментальна система калібрування для перетворення підрахунків гамма-випромінювання в концентрації цих елементів у пластах. Енергетичні "вікна", які використовувалися в аналізі, зображено на рис. 2 (Pemper, 2020).

Незважаючи на те, що при аналізі використовувалися лише три енергетичні "вікна", прилад Spectralog записував 256 каналів на кожному кроці вимірювань, у випадку, якщо вони будуть корисними. Як довела історія, це виявилось дуже корисним для майбутнього покоління імпульсних нейтронних приладів.

Поєднання імпульсного генератора нейтронів, нової електроніки та технології вимірювання енергії гамма-квантів в одному пристрої призвели до створення нового приладу імпульсного нейтронного каротажу – приладу С/О-каротажу. У 1971 р. Д. Арнольд, В. Шульц і Г. Сміт з Техасо (США) подали патент на систему імпульсного



нейтронного каротажу для вимірювання вмісту С, О, Са і Si (Arnold et al., 1973). Важливо відзначити, що у цьому методі у відношення вмісту С/О вводилася поправка за наявність неорганічного вуглецю в матриці породи (наприклад, вуглецю у матриці карбонатів) за допомогою вимірювання відношення вмісту Са/Si з спектра непружних розсіювань. Це стало дуже важливим рішенням, оскільки в породах може міститися більше вуглецю, ніж ВВ у пустотному просторі. Перший прилад С/О-каротажу

дав змогу проводити лише стаціонарні дослідження у свердловині з інтервалом спостереження від 1 до 10 хвилин. Пізніше, у 1976 р., оригінальний прилад удосконалили і вже проводили каротаж у режимі постійного запису (Wichman et al., 1976; Flynn et al., 1981; Hopkinson et al., 1981; Oliver et al., 1981). Саме для інтерпретації С/О-каротажу вперше було застосовано моделі Монте-Карло (MCNP-моделі) для врахування наявності нафти у свердловині.

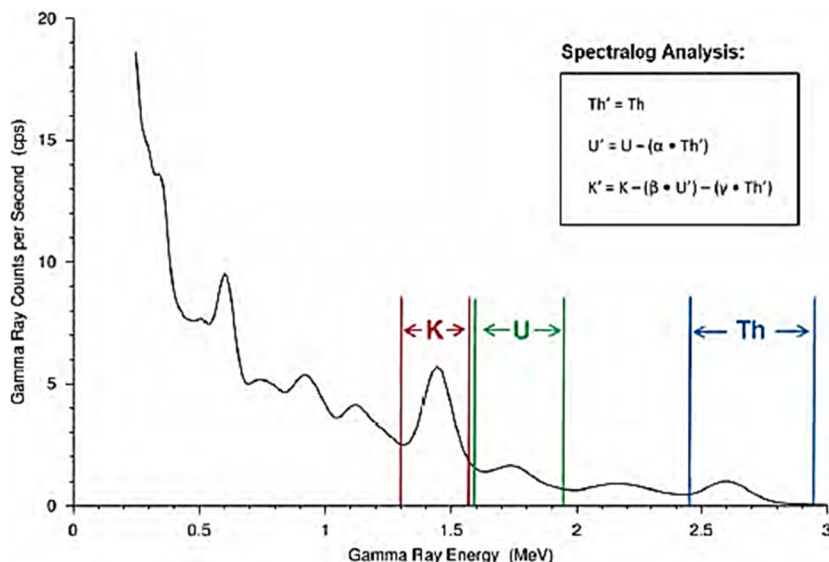


Рис. 2. Приклад методології, використаної приладом Spectralog для визначення спектральних компонентів природного гамма-випромінювання, які включали торій, калій і уран (Pemper, 2020)

У наступні десятиліття інші компанії нафтогазової галузі розробили свої прилади С/О-каротажу: Induced Gamma Ray Tool (IGT) (Hertzog, 1980), Gamma Ray Spectroscopy Tool (GST) (Westaway et al., 1983), Pulsed Spectral Gamma Ray Tool (PSG) (Jacobson et al., 1991; Wyatt et al., 1992). У цих приладах врахували недоліки першого приладу, зокрема покращили роздільну здатність спектра, автоматичне регулювання посилення детектора та відношення сигнал-завада, що в кінцевому результаті значно підвищило статистичну точність вимірів.

Головною перевагою С/О-каротажу є можливість визначати нафтонасичення у пластах, коли мінералізація пластових вод занизька для Sigma-каротажу за умови, що пористість пласта достатньо висока, а діаметр свердловини не надто великий.

Окрім відношення С/О, для визначення нафтонасичення інтерпретатори використовують відношення вмістів:

- Si/(Ca+Si) зі спектра непружних розсіювань для визначення літології;
- H/(Ca+Si) зі спектра захоплення нейтронів для визначення пористості;
- Fe/(Ca+Si) зі спектра захоплення нейтронів для визначення глинистості.

На рис. 3 показано приклад запису С/О-каротажу (Fitz, 2023) для моніторингу водонафтового контакту (ВНК). З рисунку очевидно, що моніторинговий запис відношення С/О порівняно з базовим записом чітко відображає рух ВНК у пластах C2-C4 та B2.

**Роль MCNP-моделювання.** Традиційно інтерпретація імпульсного нейтронного каротажу була лише якісною і полягала у визначенні глибини водонафтового контакту (ВНК), газонафтового контакту (ГНК), газоводяного контакту (ГВК) або визначенні інтервалів закачування газу чи води. Однак з часом у видобувних компаній виникла

потреба у точному визначенні зміни нафто- чи газонасичення порід. Ця точність була необхідною для економічної оцінки шансів на фінансовий успіх при застосуванні нових методів розробки пластів на родовищах. Така точність вимагала не лише каротажних вимірювань, але й відомостей про властивості пластів та флюїдів, а також вірно розроблених моделей реакції приладів для того, щоб точно обчислити насичення пластів. Саме для цього й почали використовувати математичний метод моделювання Монте-Карло (MCNP-моделювання).

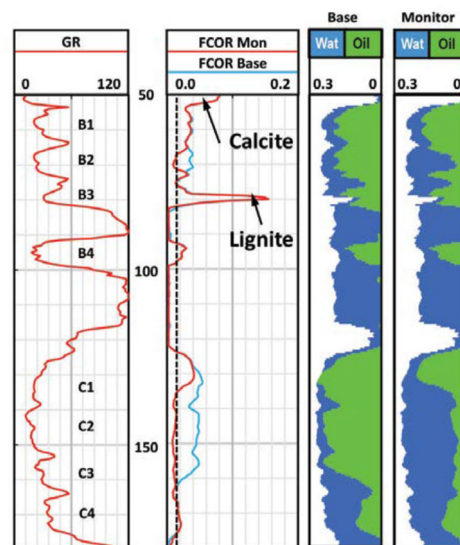


Рис. 3. Приклад запису С/О каротажу для моніторингу водонафтового контакту (ВНК) (Fitz, 2023)

Вперше метод Монте-Карло використав Енріко Фермі на початку 1930-х рр. для розрахунку властивостей переносу нейтронів. У 1950-х і 1960-х рр. XX ст. розроблено коди Монте-Карло для моделювання переносу нейтронів, гамма-квантів і фотонів (MCN, MCG і MCP). Ці коди були об'єднані в узагальнений код під назвою MCNP і вперше опубліковані у 1977 р. Цей об'єднаний код був кодом N-частинок загального призначення Монте-Карло, який можна було використовувати для моделювання переносу нейтронів, фотонів, електронів або зв'язаного переносу нейтронів/фотонів/електронів (Fitz, 2023). Першою використаною для геофізичних досліджень свердловин була версія 3 (1983 р.), а модифіковану версію 3A задокументували кількома роками пізніше (Briesmeister, 1987). У 1980-х і 1990-х рр. провели значний обсяг моделювання за методом Монте-Карло для відтворення ядерних процесів, пов'язаних із вимірюваннями, виконаними приладами імпульсного нейтронного каротажу. Хоч більшість моделювання проводили сервісні компанії, деякі видобувні компанії також його використовували.

Різні параметри пласта та свердловини впливають на нейтрони, що ускладнює інтерпретацію отриманих матеріалів. На перенос нейтронів впливають вміст свердловини, мінералогія пласта, пористість, пластові флюїди та глинистість. Зменшення впливу параметрів, не пов'язаних з газонасиченістю пласта, дуже важливе. Саме для врахування цих параметрів застосовують MCNP-моделі, які на сьогодні потрібні для точного визначення нафто- чи газонасичення пластів в обсаджених свердловинах.

MCNP-моделі використовують для прогнозування реакції кривої відношення значень на ближньому (БД) та дальньому детекторах (ДД), відношення відліків БД/ДД для непружного розсіювання нейтронів, так і для кривої БД/ДД для захоплення нейтронів. При цьому враховують різні свердловинні умови, такі як: розмір долота, розміри НКТ та обсадної колони, наявність/відсутність цементу, літологія пласта, властивості свердловинних флюїдів (щільність і мінералізація) і пластових флюїдів (щільність, мінералізація і склад газу).

На рис. 4 зображено MCNP-модель для імпульсно-нейтронного приладу CRE (Weatherford): (а) відношення відліків БД/ДД для непружного розсіювання та (б) відношення відліків БД/ДД для захоплення. Чорна крива відображає реакцію приладу у випадку 100%-го насичення пустот водою з мінералізацією 200 мг/л, червона крива – реакцію приладу у випадку 100%-го насичення пустот газом густиною 0,6 кг/м<sup>3</sup>.

**Нове покоління багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів.** Після появи імпульсних нейтронних приладів Sigma та C/O-каротажу було зроблено спробу розробити версію цих приладів, які могли б проводити дослідження через насосно-компресорні труби (НКТ). Перший прилад малого діаметру, який мав змогу запису через НКТ, створено у 1991 р., через 28 років після першого приладу Sigma-каротажу і через 18 років після першого приладу C/O-каротажу. Проте це був один із головних проривів, який зробив революцію в галузі дослідження імпульсними нейтронними приладами. Сучасні моделі таких приладів продовжують удосконалюватися і сьогодні.

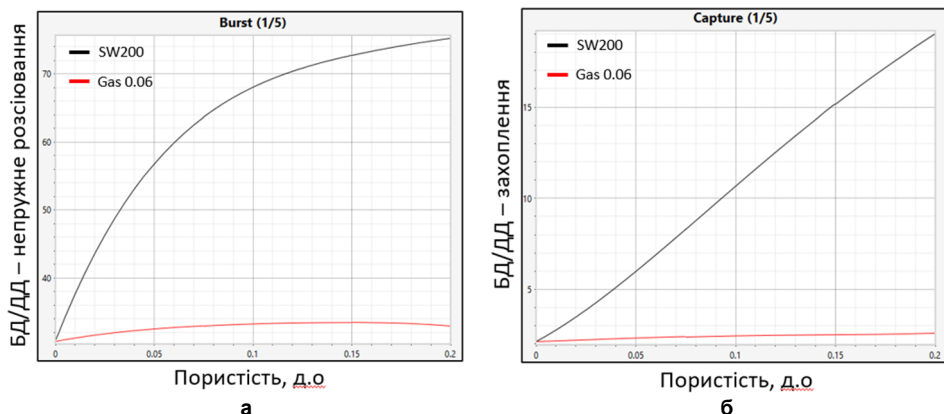


Рис. 4. MCNP-модель для імпульсно-нейтронного приладу Raptor (Weatherford): відношення відліків БД/ДД для непружного розсіювання (а); відношення відліків БД/ДД для захоплення (б)

Першим багатодетекторним приладом з малим діаметром був Reservoir Saturation Tool (RST), представлений у 1991 р. (Roscoe et al., 1991; Scott et al., 1991) і обладнаний двома сцинтиляційними детекторами GSO (оксиортофосфат гадолінію, легованого церієм). Використання цих кристалів забезпечувало більшу чутливість до реєстрації гамма-квантів, а отже, більшу статистичну точність вимірювань. Прилад RST міг працювати в режимі C/O- та Sigma-каротажу. Цей прилад також давав змогу проводити елементний аналіз порід.

Наступними багатодетекторними приладами, які почали застосовувати для дослідження обсаджених нафто-газових свердловин, були Reservoir Monitor Tool (RMT) (Jacobson et al., 1998) та Reservoir Performance Monitor (RPM) (Gilchrist et al., 1999; Mickael et al., 1999; Gilchrist et al., 2000). У 2008 р. створено прилад Cased-Reservoir Evaluation (CRE) (Odom et al., 2008), з того часу відомий як Raptor. Це був перший прилад у галузі, який

використовував новітню технологію сцинтиляційного детектора LaBr<sub>3</sub> (Menge et al., 2007), та детектор швидких нейтронів (Odom et al., 2002). Прилад CRE давав змогу записувати каротаж у трьох режимах: C/O, Sigma та детектування газу.

Найновішим приладом малого діаметра є Pulsed Neutron Extreme Tool (PNX) (Rose et al., 2015; Zhou et al., 2016). Цей прилад містить два сцинтиляційні детектори LaBr<sub>3</sub>, один сцинтиляційний детектор YAP (ітрій-алюмінієвий перовскіт) і детектор швидких нейтронів. PNX давав змогу запису у режимах C/O, Sigma, детектування газу, а також вимірювання нейтронної пористості та проведення елементного аналізу порід.

На рис. 5 зображено основні сучасні багатодетекторні прилади імпульсного нейтронного каротажу. Використання нових подібних приладів дозволяє охопити більший об'єм нейтронно-гамма-транспортного поля та забезпечує більш високу чутливість вимірювання кількох

важливих властивостей пласта, зокрема й до виявлення газонасичених пластів з пористістю до 5 % (Zett et al., 2011). Детектори, розміщені на різних осевих відстанях від нейтронного генератора, дають змогу досліджувати пласт на різних глибинах. Масив із кількох спектроскопічних детекторів забезпечує гнучкість у змішуванні показів. Наприклад, можна використовувати детектори окремо для дослідження проникнення флюїдів у відкритих свердловинах, а також змішувати покази детекторів, щоб досліджувати пласт на різних глибинах (Gyllensten et al., 2009).

Застосування сучасних багатодетекторних приладів імпульсного нейтронного каротажу в поєднанні з MCNP-моделями для кількісного визначення газонасиченості

набувають дедалі більшого поширення при моніторингу газонасичення в обсаджених свердловинах.

На рис. 6 зображено зведений планшет свердловини A2 на газовому родовищі в межах Адріатичного моря (Bertoli et al., 2013). У пласті № 1 спостерігається знижене газонасичення порівняно зі значеннями насичення, отриманими за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС) у відкритому стовбурі. Інтерпретація комплексу імпульсного нейтронного каротажу дала змогу визначити залишкове газонасичення у пласті, що розробляється. У свою чергу у пласті № 2, який не розроблявся, газонасичення, визначене за допомогою імпульсного нейтронного каротажу, підтвердило рівень його високого значення за даними ГДС у відкритому стовбурі.

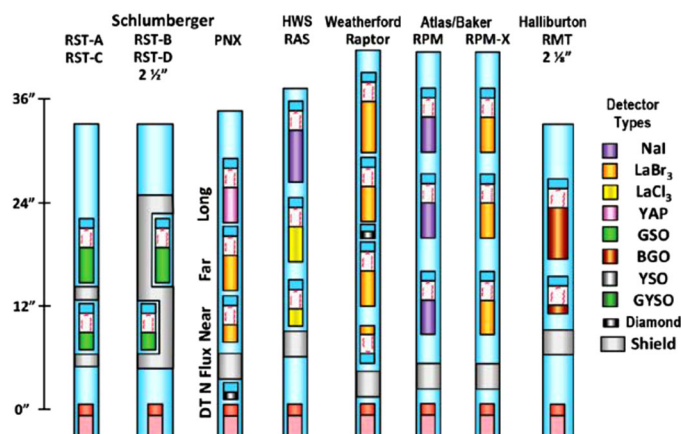


Рис. 5. Сучасні багатодетекторні прилади імпульсного нейтронного каротажу (Fitz, 2023)

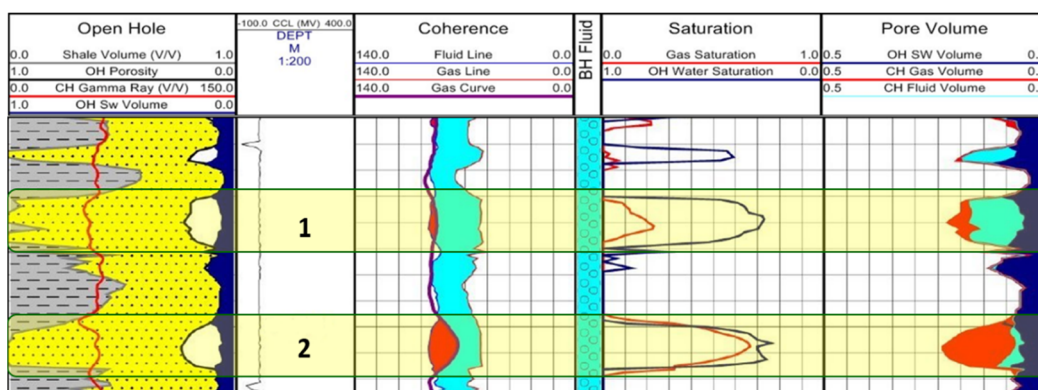


Рис. 6. Зведений планшет інтерпретації багатодетекторним приладом імпульсного нейтронного каротажу у свердловині A2 (Адріатичне море) (Bertoli et al., 2013)

**Поточний стан досліджень у світі.** Сучасне застосування багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів дає змогу вирішувати такі завдання:

- кількісне визначення нафто-, газо- та водонасичення пластів;
- визначення фільтраційно-ємнісних властивостей та літології порід через обсадну колонну;
- оцінка глибини контакту між флюїдами;
- визначення типу ВВ;
- моніторинг видобутку ВВ;
- виявлення пропущених пластів-колекторів в обсаджених свердловинах;
- охарактеризування зон з пониженим пластовим тиском;
- прогнозування кривих ГДС за допомогою нейронних мереж;
- оцінка якості проведення гідророзриву пласта.

Окрім названих застосувань сучасних багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів, їх використання в поєднанні з моделями MCNP, створеними під конкретні свердловинні умови, показали дуже якісні результати з визначення пористості та газонасичення у щільних породах різної літології. Таке поєднання показало успішні результати на родовищах у Північній Америці. Mekic N. et al. (2016) вдалося виділити газонасичені вапняки відкладів Union Valley та Viola (родовище на території штату Оклахома, США) із середньою пористістю 1,5–2,5 %. Також багато досліджень проведено і на родовищах, розташованих на території Скелястих гір, основними породами-колекторами яких є ущільнені глинисті пісковики із середньою пористістю 6–10 %. До прикладу, у роботі R. Ansara et al. (2009) дослідження були проведені у шести обсаджених свердловинах за допомогою приладу RPM у режимі GasView. Отримані результати з виділення газонасичених порід-колекторів показали стійку



кореляцію з результатами, отриманими при дослідженнях відкритого стовбура свердловин.

В останні десятиліття постійна еволюція ринку нетрадиційних порід-колекторів ставить нові виклики до розробки технологій для визначення властивостей сланцевих колекторів. Використання сучасних багатодетекторних приладів імпульсного нейтронного каротажу є одним із шляхів до визначення потенціалу сланцевих порід, особливо в горизонтальних свердловинах. Застосування цих приладів у обсаджених горизонтальних свердловинах значно зменшує ризики і економічні витрати на проведення каротажу. Наприклад, у 2019 р. за допомогою приладу CRE виконано каротаж у горизонтальній свердловині з метою детального дослідження сланців Barnett. Результати інтерпретації дали змогу виділити газонасичені інтервали, визначити пористість та літологію порід-колекторів (Advancements in Shale Reservoir Characterization Optimize Capital Expenditures, 2019).

**Поточний стан досліджень в Україні.** Імпульсний нейтронний гамма-каротаж в Україні використовують досить обмежено. Традиційно ІНГК застосовується у двох модифікаціях:

- імпульсний нейтронний гамма-метод з реєстрацією гамма-випромінювання радіаційного захоплення нейтронів (ІНГМ-РЗ) та
- імпульсний нейтронний  $\gamma$ -метод непружного розсіювання (ІНГМ-НР).

За допомогою ІНГМ-НР на сучасному етапі в Україні найчастіше визначають вміст у гірських породах чотирьох елементів: С, О, Si і Ca. С/О-каротаж – найпоширеніша модифікація ІНГК-НР. Практичний досвід робіт в Україні показує, що для кількісної інтерпретації даних С/О-каротажу потрібна опорна інформація у вигляді результатів ГДС відкритого стовбура і дані ІННК і СГК в обсадженому стовбурі (Вижва та ін., 2023).

Прилад ІНГМ-РЗ застосовують для визначення вмісту в гірських породах водню, хлору та заліза. При комплексуванні модифікацій ІНГМ-НР та ІНГМ-РЗ отримується значно більша інформація про досліджені гірські породи та флюїди, що їх насичують (Вижва та ін., 2012). За відношенням С/О оцінюють водо- або нафтонасиченість пластів-колекторів, а тип колектора визначається за допомогою відношення вмістів Si/Ca: малі його значення характерні для карбонатних порід, а підвищені – для піщано-глинистих відкладів. Також визначається залізистість гірської породи (відношення вмістів  $Fe/(Ca+Si)$ ), дається оцінка пористості порід (відношення  $H/(Ca+Si)$ ) та показника мінералізації підземних вод (відношення  $Cl/H$ ).

Натомість найширшого використання на виробництві для дослідження обсаджених свердловин з метою визначення поточного значення насичення набув ІННК, який використовують в Україні починаючи з 1960-х рр. На сьогодні в країні для проведення ІННК застосовують спеціалізовану апаратуру типу ІГН-4 та інші сучасніші модифікації (МФНГ-341, 34; МФНГ-601, 60 та ін.). Ці прилади мають два або три зонди.

ІННК дає змогу проводити літологічне розчленування гірських порід і визначати їхні характеристики за основними нейтронними параметрами – середнім терміном життя нейтронів  $t$  і коефіцієнтом дифузії нейтронів  $D$ , останній тісно пов'язаний із пористістю породи. Досить позитивні результати отримано при використанні ІННК для визначення положення ВНК, пористості і нафтонасиченості порід-колекторів. Важливим завданням, яке успішно розв'язують шляхом застосування ІННК, є визначення ГНК та ГВК в пластах. Перехід від насиченої рідини до газонасиченої частини пласта супроводжується зниженням

густини породи і вмісту водню, що призводить до збільшення значень  $t$  і  $D$ .

Федоришин та ін. (2012) розглядали застосування методів математичної статистики в комплексі з ІННК для виділення продуктивних порід-колекторів на прикладі тонкошаруватих неогенових відкладів Летнянського газового родовища. Зокрема автори визначили, що асиметрія  $A$  та ексцес  $E$  швидкостей за даними імпульсного нейтрон-нейтронного (ІННК) та акустичного каротажу (АК) можуть бути інформативними для оцінки характеру флюїдонасиченості та піскуватості тонкошаруватих відкладів.

ІННК використовують і для визначення характеру насичення низькоомних колекторів. Ручко та ін. (2016) провели оптимізацію інтервалу часової затримки при реєстрації діаграм ІННК з метою більш однозначного розподілу пластів на нафто- і водонасичені; визначили нейтронні властивості порід (декремент затухання нейтронів у скелеті породи, воді та глині).

У роботі Кулінкович та ін. (2008) розглянуто випробування імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу в модифікації темпорального зондування на прикладі даних ГДС дослідження Матлахівського родовища. Автори отримали криву темпорального зондування, тобто криву зміни уявного декременту затухання від часу затримки, і застосували "метод трьох кривих". Цей метод передбачає обчислення для кожного значення глибини по осі свердловини осередненого значення декременту затухання для трьох інтервалів кривої темпорального зондування: для "ближньої" (затримки 5–11 С), "середньої" (затримки 12–18 С) і "дальної зони" (затримки 19–25 С). Використаний підхід дає змогу визначити або уточнити характер насичення порід-колекторів та кількісно оцінити коефіцієнт нафто- або газонасичення, проводити моніторинг видобутку ВВ та виявляти ВНК або ГВК та контролювати їх зміну. Варто відзначити, що для отримання коректних результатів кількісної інтерпретації за даною методикою необхідною процедурою є "налаштування" нейтронних петрофізичних моделей, що вимагає наявності даних ГДС у відкритому стовбурі, зокрема і попередньо визначених коефіцієнтів глинистості, пористості, відносної нафто- та газонасиченості.

До основних недоліків розглянутих підходів для визначення насичення порід-колекторів за вітчизняними імпульсними нейтронними-нейтронними методами належать використання моделей, що допускають однорідність нейтронних властивостей скелета породи водонасиченої і нафтонасиченої частини пласта; потреба наявності результатів ГДС у відкритому стовбурі, даних по реперних пластах із відомим максимальним та мінімальним значеннями насичення та ін. Невиконання цих умов значно збільшує похибку визначення поточного насичення пласта. Крім того, залишається нерозв'язаною проблема врахування свердловинних умов, літологічного складу порід, типу та складу флюїду у пустотному просторі, що впливатимуть на поширення нейтронів у свердловину та пласт, і подальшу їх реєстрацію приладами.

В останні десятиліття видобувні компанії в Україні на родовищах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) та Передкарпатського прогину почали використовувати сучасні багатодетекторні імпульсні нейтронні прилади, які пропонують зарубіжні сервісні компанії. У роботі С. Cavalleri et al. (2021) представлено результати дослідження приладом PNХ у свердловині Більче-Волицької зони Передкарпатського прогину. Традиційно газові породи-колектори Міоцену цієї зони становлять великі труднощі при інтерпретації даних ГДС через свою тонкошаруватість та високу глинистість. Автори показали, що з використанням

приладу FNХ вдалося детально визначити мінералогію порід, а визначення параметра FNХS та Sigma з високою роздільною здатністю дали змогу точно виділити інтервали газонасичених пісковиків.

Використання сучасних багатодетекторних імпульсних нейтронних приладів на родовищах ДДЗ також показало дуже хороші результати. До прикладу, у роботі (Iuras et al., 2021) представлено результати дослідження приладом PNХ у трьох свердловинах різних родовищ. У свердловинах А і В, які були похилоскерованими, не вдалося здійснити запис ГДС у відкритому стовбурі у зв'язку з високими геологічними ризиками, натомість було здійснено дослідження приладом PNХ в обсаджених свердловинах, за допомогою якого вдалося отримати детальну літологію, ефективну пористість та кількісно визначити газонасиченість пісковиків. У випадку свердловини С дослідження проведено в інтервалі, який був представлений сланцями з підвищеним вмістом органіки та карбонатними породами. У результаті автори отримали детальну літологію, коефіцієнти ефективної пористості і газонасиченості вапняків, а також визначили параметр ТОС (total organic carbon) в органогенних сланцях.

За допомогою приладу CRE було проведено дослідження у трьох свердловинах одного з найбільших родовищ України, яке розташовано у приосьовій зоні південно-західної частини ДДЗ (О. Petrukushyn et al., 2024). Основна мета цієї роботи полягала в двох аспектах: визначити поточний коефіцієнт газонасичення в пісковиках та оцінити рівень виснаження цих пластів; знайти та оцінити потенційні породи-колектори в інтервалі евапоритів. Особливу складність у даному дослідженні становила майже повна відсутність даних ГДС у відкритому стовбурі, оскільки свердловини були пробурені ще у 1960-х рр. Результати оцінки газонасичення показали, що залишкове насичення газом лежить у діапазоні 35–40 %. Цей результат підтверджений даними з видобутку, які показали, що пласти досягли 90 % від свого потенціалу. В інтервалі евапоритів виділено породи-колектори із середньою пористістю 8–15 % та коефіцієнтом газонасичення 30–50 %. Окрім того, за допомогою активації кисню вдалося визначити інтервали притоку пластової води у фільтрових частинах трьох свердловин.

#### Дискусія і висновки

Імпульсний нейтронний каротаж відігравав і продовжує відігравати значну роль у дослідженні та моніторингу обсаджених нафтогазових свердловин. До початку 1990-х рр. доводилося використовувати два різних типи приладів, щоб виконати Sigma- та С/О-каротаж. Це змінилося з появою перших багатодетекторних приладів імпульсного нейтронного каротажу. На сьогодні сучасні прилади дають змогу здійснювати не лише Sigma- та С/О-каротаж за допомогою одного приладу, але й отримати відношення відліків на ближньому та дальньому детекторах для непружного розсіювання та захоплення нейтронів, за допомогою яких можна кількісно оцінити газонасичення порід, фільтраційно-ємнісні властивості порід-колекторів та детальну літологію.

Що стосується України, то нам належить пройти великий шлях з удосконалення вітчизняних приладів імпульсного нейтронного каротажу, необхідними кроками якого є впровадження сучасних апаратних рішень. До прикладу, використання нових і більш чутливих сцинтиляційних детекторів гамма-квантів та збільшення кількості детекторів, що підвищить глибину дослідження приладів. Основним та, мабуть, найголовнішим запровадженням має стати використання при інтерпретації результатів проведення каротажу MCNP-моделей, які

будуть враховувати конкретні свердловинні умови, літологічний склад порід, тип та склад флюїду в пустотному просторі. Це дасть змогу набагато точніше кількісно визначати коефіцієнт нафто- чи газонасичення порід.

**Внесок авторів:** Ірина Безродна – написання (перегляд і редагування); Олег Петрокушин – концептуалізація, написання (оригінальна чернетка).

#### Список використаних джерел

- Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., & Шабатура, О. В. (2023). *Ядерно-геофізичні методи дослідження свердловин*. ВПЦ "Київський університет".
- Вижва, С. А., Онищук, І. І., & Черняев, О. П. (2012). *Ядерна геофізика*. ВПЦ "Київський університет".
- Кулінкович, А. Є., Косаченко, В. Д., & Ліннік, К. В. (2008). Випробування методу імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу в модифікації темпорального зондування в комп'ютерній технології "Геоплуш" на матеріалі нафтогазових свердловин Дніпровсько-Донецької западини. *Геоінформатика*, (4).
- Ручко, В. О., & Ручко, К. О. (2016). Визначення характеру насичення низькоомних колекторів за даними імпульсного нейтрон-нейтронного методу. *Мінеральні ресурси України*, (2).
- Федоришин, Д. Д., & Пятковська, І. О. (2012). Комплексна інтерпретація результатів імпульсного нейтрон-нейтронного каротажу та параметрів математичної статистики для підвищення видобутку газу із порід-колекторів тонкошаруватих неогенових відкладів. *Нафтогазова енергетика*, (2).
- Advancements in shale reservoir characterization optimize capital expenditures. (2019). <https://www.worldoil.com/magazine/2019/march-2019/features/advancements-in-shale-reservoir-characterization-optimize-capital-expenditures/>
- Ansari, R., Mekic, N., Chace, D., Rust, M., & Starr, M. (2009). Field Applications Of A New Cased Hole Gas Saturation Measurement In Tight Gas Reservoirs. In *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*. The Woodlands, Texas.
- Arnold, D. M., Schultz, W. E., & Smith, H. D., Jr. (1973). *Pulsed Neutron Logging System* (US Patent No. 3,780,302).
- Bertoli, S., Borghi, M., Galli, G., Oprea, A., & Riley, S. (2013). Field Trials of a new Array Pulsed Neutron Formation Gas Measurement in Complex Completions. In *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Ravenna, Italy.
- Briesmeister, J. F. (1987). *MCNP—A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3A*. National Technical Information Service, US Department of Commerce. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/18/044/18044302.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/044/18044302.pdf)
- Cavalleri, C., Akashev, Y., Ahmad, S., Yuras, S., Karpyn, V., & Abdelatif, I. (2021). Advanced Formation Evaluation Approaches in Complex Low-Resistivity Thin Shale Laminations: Success Case Histories from Western Ukraine. <https://doi.org/10.2118/208513-ms>
- Fearon, R. E., & Thayer, J. M. (1955). *Method for Neutron Well Logging* (US Patent No. 2,712,081).
- Fitz, D. E. (2023). Evolution of Casedhole Nuclear Surveillance Logging Through Time. *Petrophysics*, 64(4), 473–501. <https://doi.org/10.30632/pjv64n4-2023a1>
- Flynn, J., Conley, S., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). *Cased Hole Exploration and Recompletions in West Texas Based on the Continuous Carbon/Oxygen (C/O) Log*. <https://doi.org/10.2118/9714-ms>
- Gilchrist, W. A., Pemper, R. R., Trcka, D., Frost, E., Jr., & Wilson, W. (2000). Initial Field Applications of a New 1.7-Inch Pulsed Neutron Instrument. In *SPWLA 41st Annual Logging Symposium*. Dallas, Texas, USA.
- Gilchrist, W. A., Prati, E. J., Pemper, R., Mickael, M., & Trcka, D. (1999). Introduction of a new through-tubing multifunction pulsed neutron instrument. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1999*(SPE 56803), 1–10. <https://doi.org/10.2118/56803-ms>
- Gyllenstein, A., Al-Arifi, S., Al Hammadi, M., Al Marzouqi, K., Madjidi, A., Mauborgne, M. L., & Weller, G. (2009). Advances in LWD sigma measurements and application to real-time formation evaluation in carbonate reservoirs. *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*, Paper M.
- Hertzog, R. C. (1980). Laboratory and field evaluation of an inelastic neutron scattering and capture gamma ray spectrometry tool. *SPE Journal*, 20(05), 327–340. <https://doi.org/10.2118/7430-pa>
- Hopkinson, E. C., Fertl, W. H., & Oliver, D. W. (1982). The continuous carbon/oxygen log basic concepts and recent field experiences. *Journal of Petroleum Technology*, 34(10), 2441–2448. <https://doi.org/10.2118/9613-pa>
- Iuras, S., Ahmad, S., Cavalleri, C., & Akashev, Y. (2021). Logging optimization and data analysis enabling bypass pay identification and hydrocarbon quantification with advanced pulsed neutron behind casing. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2021*(SPE 208512), 1–10. <https://doi.org/10.2118/208512-ms>
- Jacobson, L. A., & Wyatt, D. F. (1996). Elemental yields and complex lithology analysis from the pulsed spectral gamma log. *The Log Analyst*, 37(1), 50–64.
- Jacobson, L. A., Etheridge, R., & Simpson, G. (1998). A new small-diameter, high-performance reservoir monitoring tool. *SPWLA 39th Annual Logging Symposium*, Paper K.
- Lock, G. A., & Hoyer, W. A. (1971). Natural gamma-ray spectral logging. *SPWLA 12th Annual Logging Symposium*, Paper AA.

- Mekic, N., McIlroy, C., Hill, F., & Guo, W. (2016). Multidetector pulsed-neutron technology for low-porosity reservoir-interpretation methodology. *SPWLA 57th Annual Logging Symposium*.
- Menge, P. R., Gautier, G., Illis, A., Rozsa, C., & Solovyev, V. (2007). Performance of large lanthanum bromide scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 579(1), 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.002>
- Mickael, M., Trcka, D., & Pempers, R. (1999). Dynamic multi-parameter interpretation of dual-detector carbon/oxygen measurements. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1999*(SPE 56649), 1–10. <https://doi.org/10.2118/56649-ms>
- Odom, R. C., Tiller, D. E., & Wilson, R. D. (2002). *Geometrically optimized fast neutron detector* (US Patent No. 6,495,837). U.S. Patent and Trademark Office.
- Odom, R. C., Tittle, C. W., Wilson, R. D., & Soran, P. D. (1992). Quantitative use of computer models in calibration of the Computalog pulsed neutron thermal decay tool (PND). *SPWLA 33rd Annual Logging Symposium*, Paper P.
- Odom, R., Dahlin, T., Dolliver, D., Elizondo, E., Seeds, E., Starnes, J., & Wilson, R. (2008). Design and initial field-test results of a new pulsed neutron logging system for cased reservoir characterization. *SPWLA 49th Annual Logging Symposium*, Paper O.
- Oliver, D. W., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). Continuous carbon/oxygen (C/O) logging – instrumentation, interpretive concepts and field applications. *SPWLA 22nd Annual Logging Symposium*, Paper TT.
- Pemper, R. (2020). A history of nuclear spectroscopy in well logging. *Petrophysics*, 61(6), 523–548. <https://doi.org/10.30632/pjv61n6-2020a1>
- Petrokushyn, O., Abliakimov, L., & Kuznetsov, V. (2024). Cased hole reservoir evaluation in old wells with complex completion and lithology – A case study from a mature gas field in the Dnieper-Donets Basin, Ukraine. *International Petroleum Technology Conference, 2024*(IPTC-24445), 1–10. <https://doi.org/10.2523/iptc-24445-ms>
- Randall, R. R., Lawrence, T. D., Frost, E., & Fertl, W. H. (1985). PDK-100 log examples in the Gulf Coast. *SPWLA 26th Annual Logging Symposium*, Paper XX.
- Randall, R. R., Oliver, D. W., & Fertl, W. H. (1986). The PDK-100 Enhances Interpretation Capabilities for Pulsed Neutron Capture Logs. In *Transactions, SPWLA 27th Annual Logging Symposium* (Paper JJJ). Society of Professional Well Log Analysts.
- Roscoe, B. A., Stoller, C., Adolph, R. A., Boutemy, Y., Cheeseborough, C., Hall, J. S., ... Thomas, S. R. (1991). A New Through-Tubing Oil-Saturation Measurement System. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-21413-MS*. <https://doi.org/10.2118/21413-ms>
- Rose, D., Zhou, T., Beekman, S., Quinlan, T., Delgadillo, M., Gonzalez, G., ... Bailly, J-P. (2015). An Innovative Slim Pulsed Neutron Logging Tool. In *Transactions, SPWLA 56th Annual Logging Symposium* (Paper XXXX). Society of Professional Well Log Analysts.
- Schmid, G. J., Pemper, R., Dolliver, D. D., Mekic, N., & Musselman, J. (2018). A Diffusion-Corrected Sigma Algorithm for a Four-Detector Pulsed-Neutron Logging Tool. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-191738-MS*. <https://doi.org/10.2118/191738-ms>
- Schultz, W. E., Smith, H. D., Jr., Verbout, J. L., Bridges, J. R., & Garcia, G. H. (1983). Experimental Basis for a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper CC). Society of Professional Well Log Analysts.
- Scott, H. D., Stoller, C., Roscoe, B. A., Plasek, R. E., & Adolph, R. A. (1991). A New Compensated Through-Tubing Carbon/Oxygen Tool for Use in Flowing Wells. In *Transactions, SPWLA 32nd Annual Logging Symposium* (Paper MM). Society of Professional Well Log Analysts.
- Smith, H. D., Jr., Arnold, D. M., & Peelman, H. E. (1983). Applications of a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper DD). Society of Professional Well Log Analysts.
- Wahl, J. S., Nelligan, W. B., Frenott, A. H., Johnstone, C. W., & Schwartz, R. J. (1970). The Thermal Neutron Decay Time Log. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 10(04), 365–379. <https://doi.org/10.2118/2252-PA>
- Westaway, P., Hertzog, R., & Plasek, R. E. (1983). Neutron-Induced Gamma Ray Spectroscopy for Reservoir Analysis. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(03), 553–564. <https://doi.org/10.2118/9461-PA>
- Wichman, P. A., Hopkinson, E. C., & McWhirter, V. C. (1976). The Carbon/Oxygen Log Measurement. *The Log Analyst*, 17(6), 25–29.
- Wichman, P. A., McWhirter, V. C., & Hopkinson, E. C. (1975). Field Results of the Natural Gamma Ray Spectralog. In *Transactions, SPWLA 16th Annual Logging Symposium* (Paper O). Society of Professional Well Log Analysts.
- Wyatt, D., Jacobson, L. A., Durbin, D., & Lasseter, E. (1992). Logging Experience With a New Induced Gamma Spectrometry Tool. In *Transactions, SPWLA 33rd Annual Logging Symposium* (Paper Y). Society of Professional Well Log Analysts.
- Youmans, A. H. (1954). *Static Atmosphere Ion Accelerator for Well Logging* (U.S. Patent No. 2,689,918). U.S. Patent and Trademark Office.
- Youmans, A. H., Bishop, W. D., & Wichmann, P. A. (1970). Applications of the Neutron Lifetime Log in New Wells. In *Transactions, SPWLA 11th Annual Logging Symposium* (Paper N). Society of Professional Well Log Analysts.
- Youmans, A. H., Millis, C. W., Hopkinson, E. C., & Bishop, W. D. (1964). The Neutron Lifetime Log. In *Transactions, SPWLA 5th Annual Logging Symposium* (Paper M). Society of Professional Well Log Analysts.
- Zett, A., Webster, M., Secombe, J., Colbert, C., Rafay Zahid Ansari, & Chace, D. (2011). Extending Production Petrophysics Applications in Monitoring Complex Recovery Mechanisms. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-146662-MS*. <https://doi.org/10.2118/146662-ms>
- Zhou, T., Rose, D., Quinlan, T., Thornton, J., Saldungaray, P., Gerges, N., Bin Mohamed Noordin, F., & Lukman, A. (2016). Fast Neutron Cross-Section Measurement Physics and Applications. In *Transactions, SPWLA 57th Annual Logging Symposium* (Paper EE). Society of Professional Well Log Analysts.

## References

- Advancements in shale reservoir characterization optimize capital expenditures. (2019). <https://www.worldoil.com/magazine/2019/march-2019/features/advancements-in-shale-reservoir-characterization-optimize-capital-expenditures/>
- Ansari, R., Mekic, N., Chace, D., Rust, M., & Starr, M. (2009). Field Applications Of A New Cased Hole Gas Saturation Measurement In Tight Gas Reservoirs. In *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*. The Woodlands, Texas.
- Arnold, D.M., Schultz, W.E., & Smith, H.D. Jr. (1973). *Pulsed Neutron Logging System*, US Patent No. 3,780,302.
- Bertoli, S., Borghi, M., Galli, G., Oprescu, A., & Riley, S. (2013). Field Trials of a new Array Pulsed Neutron Formation Gas Measurement in Complex Completions. In *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*. Ravenna, Italy.
- Briesmeister, J.F. (1987). *MCNP—A General Monte Carlo Code for Neutron and Photon Transport, Version 3A*, National Technical Information Service, US Department of Commerce, Springfield, Virginia. [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/18/044/18044302.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/044/18044302.pdf)
- Cavalleri, C., Akashev, Y., Ahmad, S., Yuras, S., Karpyn, V., & Abdelatif, I. (2021). Advanced Formation Evaluation Approaches in Complex Low-Resistivity Thin Shale Sand Laminations: Success Case Histories from Western Ukraine. <https://doi.org/10.2118/208513-ms>
- Fearon, R.E., & Thayer, J.M. (1955). *Method for Neutron Well Logging*, US Patent No. 2,712,081.
- Fedoryshyn, D. D., & Pyatkovska, I. O. (2012). Complex interpretation of pulsed neutron-neutron logging results and parameters of mathematical statistics to increase gas production from reservoir rocks of thin-layered Neogene deposits. *Oil and Gas Energy*, 2(2). [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge\\_2012\\_2\\_3](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nge_2012_2_3) [in Ukrainian].
- Fitz, D. E. (2023). Evolution of Casedhole Nuclear Surveillance Logging Through Time. *Petrophysics*, 64(4), 473–501. <https://doi.org/10.30632/pjv64n4-2023a1>
- Flynn, J., Conley, S., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). *Cased Hole Exploration and Recompletions in West Texas Based on the Continuous Carbon/Oxygen (C/O) Log*. <https://doi.org/10.2118/9714-ms>
- Gilchrist, W. A., Prati, E. J., Pemper, R., Mickael, M., & Trcka, D. (1999). Introduction of a New Through-Tubing Multifunction Pulsed Neutron Instrument. <https://doi.org/10.2118/56803-ms>
- Gilchrist, W.A., Pemper, R.R., Trcka, D., Frost, E. Jr., & Wilson, W. (2000). Initial Field Applications of a New 1.7-Inch Pulsed Neutron Instrument. In *Transactions, SPWLA 41st Annual Logging Symposium*. Dallas, Texas, USA.
- Gyllenstein, A., Al-Arifi, S., Al Hammadi, M., Al Marzouqi, K., Madjidi, A., Mauborgne, M.L., & Weller, G. (2009). Advances in LWD Sigma Measurements and Application to Real-Time Formation Evaluation in Carbonate Reservoirs. In *SPWLA 50th Annual Logging Symposium*.
- Hertzog, R. C. (1980). Laboratory and field evaluation of an inelastic neutron scattering and capture gamma ray spectrometry tool. *SPE Journal*, 20(05), 327–340. <https://doi.org/10.2118/7430-pa>
- Hopkinson, E. C., Fertl, W. H., & Oliver, D. W. (1982). The continuous carbon/oxygen log basic concepts and recent field experiences. *Journal of Petroleum Technology*, 34(10), 2441–2448. <https://doi.org/10.2118/9613-pa>
- Iuras, S., Ahmad, S., Cavalleri, C., & Akashev, Y. (2021). Logging optimization and data analysis enabling bypass pay identification and hydrocarbon quantification with advanced pulsed neutron behind casing. <https://doi.org/10.2118/208512-ms>
- Jacobson, L. A., & Wyatt, D. F. (1996). Elemental yields and complex lithology analysis from the pulsed spectral gamma log. *The Log Analyst*, 37(1), 50–64.
- Jacobson, L. A., Etheridge, R., & Simpson, G. (1998). A new small-diameter, high-performance reservoir monitoring tool. In *Transactions, SPWLA 39th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Kulinkovich, A. E., Kosachenko, V. D., & Linnik, K. V. (2008). Testing of the method of pulsed neutron-neutron logging in the modification of temporal sounding in the computer technology "Geosearch" on the material of oil and gas wells of the Dnipro-Donets Basin. *Geoinformatika*, 4, 33–38 [in Ukrainian].
- Lock, G. A., & Hoyer, W. A. (1971). Natural gamma-ray spectral logging. In *Transactions, SPWLA 12th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Mekic, N., McIlroy, C., Hill, F., & Guo, W. (2016). Multidetector pulsed-neutron technology for low-porosity reservoir-interpretation methodology. In *SPWLA 57th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Menge, P. R., Gautier, G., Illis, A., Rozsa, C., & Solovyev, V. (2007). Performance of large lanthanum bromide scintillators. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 579(1), 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.04.002>



- Mickael, M., Trcka, D., & Pemper, R. (1999). Dynamic multi-parameter interpretation of dual-detector carbon/oxygen measurements. <https://doi.org/10.2118/56649-ms>
- Odom, R. C., Tiller, D. E., & Wilson, R. D. (2002). *Geometrically optimized fast neutron detector*. US Patent No. 6,495,837.
- Odom, R. C., Tittle, C. W., Wilson, R. D., & Soran, P. D. (1992). Quantitative use of computer models in calibration of the Computalog pulsed neutron thermal decay tool (PND). In *Transactions, SPWLA 33rd Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Odom, R., Dahlin, T., Dolliver, D., Elizondo, E., Seeds, E., Starnes, J., & Wilson, R. (2008). Design and initial field-test results of a new pulsed neutron logging system for cased reservoir characterization. In *Transactions, SPWLA 49th Annual Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Oliver, D. W., Frost, E., & Fertl, W. H. (1981). Continuous carbon/oxygen (C/O) logging – instrumentation, interpretive concepts and field applications. In *Transactions, SPWLA 22nd Annual SPWLA Logging Symposium*. Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts.
- Pemper, R. (2020). A history of nuclear spectroscopy in well logging. *Petrophysics – the SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description*, 61(6), 523–548. <https://doi.org/10.30632/pjv61n6-2020a1>
- Petrokushyn, O., Abliakimov, L., & Kuznetsov, V. (2024). Cased Hole Reservoir Evaluation in Old Wells with Complex Completion and Lithology – A Case Study from a Mature Gas Field in the Dnieper-Donets Basin, Ukraine. *IPTC-24445-MS*. <https://doi.org/10.2523/iptc-24445-ms>
- Randall, R. R., Lawrence, T. D., Frost, E., & Fertl, W. H. (1985). PDK-100 Log Examples in the Gulf Coast. In *Transactions, SPWLA 26th Annual Logging Symposium* (Paper XX).
- Randall, R. R., Oliver, D. W., & Fertl, W. H. (1986). The PDK-100 Enhances Interpretation Capabilities for Pulsed Neutron Capture Logs. In *Transactions, SPWLA 27th Annual Logging Symposium* (Paper JJJ).
- Roscoe, B. A., Stoller, C., Adolph, R. A., Boutemy, Y., Cheeseborough, C., Hall, J. S., McKeon, D. C., Pittman, D., Seeman, B., & Thomas, S. R. (1991). A New Through-Tubing Oil-Saturation Measurement System. *SPE-21413-MS*. <https://doi.org/10.2118/21413-ms>
- Rose, D., Zhou, T., Beekman, S., Quinlan, T., Delgadillo, M., Gonzalez, G., Fricke, S., Thornton, J., Clinton, D., Gicquel, F., Shestakova, I., Stephenson, K., Stoller, C., Philip, O., La Rotta Marin, J. M., Mainier, S., Perchonok, B., & Bailly, J.-P. (2015). An Innovative Slim Pulsed Neutron Logging Tool. In *Transactions, SPWLA 56th Annual Logging Symposium* (Paper XXXX).
- Ruchko, V. O., & Ruchko, K. O. (2016). Determination of the nature of saturation of low-resistance collectors according to the data of the pulsed neutron-neutron method. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 29–33 [in Ukrainian].
- Schmid, G. J., Pemper, R., Dolliver, D. D., Mekic, N., & Musselman, J. (2018). A Diffusion-Corrected Sigma Algorithm for a Four-Detector Pulsed-Neutron Logging Tool. *SPE-191738-MS*. <https://doi.org/10.2118/191738-ms>
- Schultz, W. E., Smith, H. D., Jr., Verbout, J. L., Bridges, J. R., & Garcia, G. H. (1983). Experimental Basis for a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper CC).
- Scott, H. D., Stoller, C., Roscoe, B. A., Plasek, R. E., & Adolph, R. A. (1991). A New Compensated Through-Tubing Carbon/Oxygen Tool for Use in Flowing Wells. In *Transactions, SPWLA 32nd Annual Logging Symposium* (Paper MM).
- Smith, H. D., Jr., Arnold, D. M., & Peelman, H. E. (1983). Applications of a New Borehole Corrected Pulsed Neutron Capture Logging System (TMD). In *Transactions, SPWLA 24th Annual Logging Symposium* (Paper DD).
- Vyzhva, S. A., & Onyshchuk, I. I. (2012). *Nuclear geophysics: textbook*. Kyiv University Publishing and Printing Center. [In Ukrainian]
- Vyzhva, S. A., Onyshchuk, V. I., Onyshchuk, I. I., & Shabaturo, O. V. (2023). *Nuclear-geophysical methods of well research: textbook*. Kyiv University Publishing and Printing Center. [In Ukrainian]
- Wahl, J. S., Nelligan, W. B., Frentrop, A. H., Johnstone, C. W., & Schwartz, R. J. (1970). The Thermal Neutron Decay Time Log. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 10(04), 365–379. <https://doi.org/10.2118/2252-PA>
- Westaway, P., Hertzog, R., & Plasek, R. E. (1983). Neutron-Induced Gamma Ray Spectroscopy for Reservoir Analysis. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 23(03), 553–564. <https://doi.org/10.2118/9461-PA>
- Wichman, P. A., Hopkinson, E. C., & McWhirter, V. C. (1976). The Carbon/Oxygen Log Measurement. *The Log Analyst*, 17(6), 25–29.
- Wichman, P. A., McWhirter, V. C., & Hopkinson, E. C. (1975). Field Results of the Natural Gamma Ray Spectralog. In *Transactions, SPWLA 16th Annual Logging Symposium* (Paper O).
- Wyatt, D., Jacobson, L. A., Durbin, D., & Lasseter, E. (1992). Logging Experience With a New Induced Gamma Spectrometry Tool. In *Transactions, SPWLA 33rd Annual Logging Symposium* (Paper Y).
- Youmans, A. H. (1954). Static Atmosphere Ion Accelerator for Well Logging (US Patent No. 2,689,918).
- Youmans, A. H., Bishop, W. D., & Wichmann, P. A. (1970). Applications of the Neutron Lifetime Log in New Wells. In *Transactions, SPWLA 11th Annual Logging Symposium* (Paper N).
- Youmans, A. H., Millis, C. W., Hopkinson, E. C., & Bishop, W. D. (1964). The Neutron Lifetime Log. In *Transactions, SPWLA 5th Annual Logging Symposium* (Paper M).
- Zett, A., Webster, M., Seccombe, J., Colbert, C., Rafay Zahid Ansari, & Chace, D. (2011). Extending Production Petrophysics Applications in Monitoring Complex Recovery Mechanisms. *SPE-146662-MS*. <https://doi.org/10.2118/146662-ms>
- Zhou, T., Rose, D., Quinlan, T., Thornton, J., Saldungaray, P., Gerges, N., Bin Mohamed Noordin, F., & Lukman, A. (2016). Fast Neutron Cross-Section Measurement Physics and Applications. In *Transactions, SPWLA 57th Annual Logging Symposium* (Paper EE).

Отримано редакцією журналу / Received: 27.03.25  
Прорецензовано / Revised: 10.04.25  
Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Oleh PETROKUSHYN, PhD Student (Geol.)  
ORCID ID: 0000-0003-0953-2858  
e-mail: olehpetrokushyn22@gmail.com  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Iryna BEZRODNA, DSc (Geol.), Assoc. Prof., Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0002-6835-5276  
e-mail: bezin3@ukr.net  
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## PULSED NEUTRON LOGGING IN THE WORLD AND IN UKRAINE: BEGGING, ESTABLISHMENT, PRESENT

**Background.** At present, most of the oil and gas fields in Ukraine are depleted, requiring the operator companies in Ukraine to constantly monitor saturation levels and fluid movement within the reservoirs as these are crucial pieces of information for optimizing and planning further production strategies.

**Methods.** The development and current state of pulsed neutron logging as one of the main methods of monitoring the development of oil and gas fields is described in the paper.

**Results.** The article focuses on the history of the establishment of the pulsed neutron logging, starting from 1949. Further development of the technology includes the creation of neutron generators, improvement of methods and equipment, as well as the appearance of modern multi-detector tools. Two main types of pulsed neutron logging are considered: pulsed neutron-neutron logging and pulsed neutron gamma-logging, each has its own advantages and disadvantages. An important stage in the development of pulsed neutron logging was the creation of Sigma logging tools in the 1960s, which measure the neutron capture cross-section and are used to estimate the oil saturation of formation. A significant place in the paper is the analysis of the development of C/O-logging, which was first used in 1971 and determines the ratio of carbon to oxygen for estimating the oil saturation of rocks. The development of multi-detector tools made it possible to acquire logging data through tubing, which significantly expanded the possibilities of pulsed neutron logging. The achievements of domestic geophysicists in the development of pulsed neutron logging in Ukraine are also presented. Modern research is focused on the use of multi-detector tools and MCNP-models for quantitative determination of gas saturation in reservoir rocks. The use of these tools has shown high efficiency in the fields of the Dnieper-Donetsk basin and the Precarpathian depression.

**Conclusions.** The article concludes that pulsed neutron logging plays a key role in the investigation and monitoring of cased oil and gas wells and suggests further steps for the development of this technology in Ukraine, including the introduction of new detectors, an increase in the number of detectors, and the use of MCNP models for more accurate determination of reservoir saturation.

**Keywords:** pulsed neutron logging, Sigma-logging, C/O-logging, MCNP-modeling, multi-detector pulsed neutron tools.

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

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.05>

Євгенія В'ЯЗОВСЬКА<sup>1</sup>, фахівець  
ORCID ID: 0009-0002-6652-5179  
e-mail: yevheniia.viazovska@ugv.com.ua

Ігор МИХАЛЕВИЧ<sup>2</sup>, начальник Карпатського відділу  
геологорозвідувальних робіт Департаменту розвідки  
ORCID ID: 0009-0009-5786-8648  
e-mail: ihor.mykhalevych@ugv.com.ua

Василь КАРПИН<sup>2</sup>, провідний інженер  
з дослідження фізики порід департаменту геофізики  
ORCID ID: 0009-0003-3261-2634  
e-mail: vasyi.karpyn@ugv.com.ua

Степан ДУЧУК<sup>3</sup>, головний геолог  
Західно-Української геофізичної розвідувальної експедиції  
ORCID ID: 0009-0004-6384-7054  
e-mail: dushuk@ukr.net

<sup>1</sup>УкрНДІгаз, Київ, Україна

<sup>2</sup>АТ "Укргазвидобування", Київ, Україна

<sup>3</sup>ДГП "Укргеофізика", Львів, Україна

## ДОСТОВІРНІСТЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ГАЗОНОСНОСТІ КОЛЕКТОРІВ У БІЛЬЧЕ-ВОЛИЦЬКІЙ ЗОНІ ЗА ДАНИМИ СТАНЦІЇ ГТД

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

**Вступ.** Розглянуто можливість прогнозування газонасності колекторів у Більче-Волицькій зоні за даними станції геолого-технологічних та геохімічних досліджень (ГТД). Проаналізовані фактори, що негативно впливають на інформативність таких даних. Неточність даних станції, зокрема, пов'язана з особливостями режимів буріння і використанням PDS-доліт. Попри все, за даними станції ГТД проводять первинне виділення перспективних у контексті газонасності горизонтів, а уточнення та остаточна верифікація газонасності відбувається після комплексу геофізичних досліджень свердловини (ГДС). За обмеженої роздільної здатності каротажних методів у тонкошаруватому сарматському розрізі та в ущільнених карбонатах верхньої юри, рішення щодо об'єкта випробування інколи приймається на підставі даних керн та зафіксованих газопоказів. У статті піде мова про те, чи є дані станції ГТД релевантними для розв'язання таких задач та як вони статистично корелюються з результатами випробувань.

**Методи.** Аналіз газових аномалій, зафіксованих станцією ГТД, включає кілька етапів: вибір свердловин для порівняння газових аномалій, в яких отримано промисловий приплив газу на основі петрофізичної оцінки пластів-колекторів та пластового тиску; врахування часу відставання виходу газу з вибою, газу свабіювання (випущення газу шляхом пониження рівня рідини), газу після наросування, рециркуляційного газу та місць, де було введено домішки нафтопродуктів в буровий розчин.

**Результати.** Виконано детальний аналіз газових аномалій; проведено петрофізичну оцінку пластів-колекторів в інтервалах підвищених газопоказів; розраховано коефіцієнти контрастності в інтервалах перфорації в 11 свердловинах.

**Висновки.** Підтверджено релевантність даних ГТД для попереднього виділення перспективних горизонтів газонасності. Встановлено, що коефіцієнт контрастності ( $K_{\text{кон}}$ ) є інформативним показником при аналізі газових аномалій. Значення  $K_{\text{кон}}$  в межах 4,3–6,3 вказують на перспективність інтервалу до випробування.

**Ключові слова:** геолого-технологічні та геохімічні дослідження, газ, фонове значення газу, коефіцієнт контрастності, дебіт газу.

### Вступ

**Постановка проблеми.** За даним станції ГТД можна зробити попереднє виділення перспективних горизонтів, яке потім підтверджується або спростовується за даними промислово-геофізичних досліджень свердловин (Прокопів,

2004). Проте не всі типи колекторів можна охарактеризувати за даними ГДС. Особливо це стосується тонкошаруватих сарматських відкладів, у яких продуктивними колекторами можуть бути пласти пісковиків завтовшки у кілька сантиметрів (рис. 1).

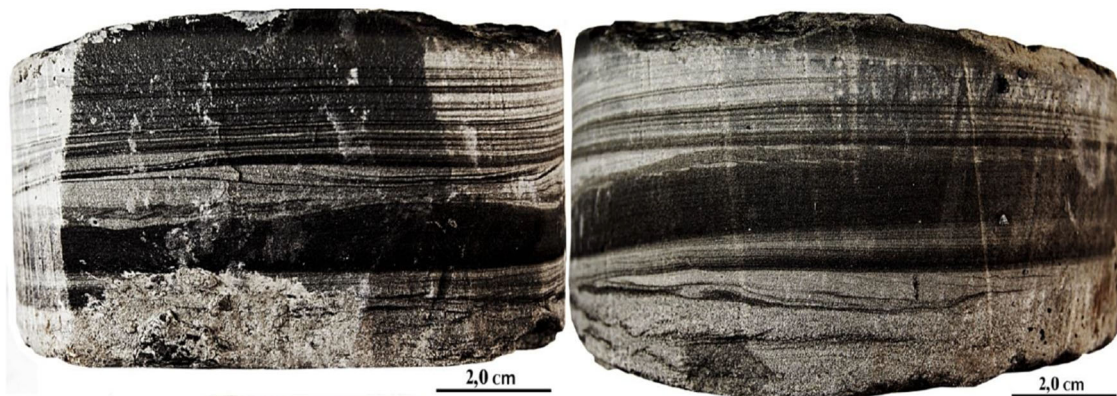


Рис. 1. Зразок керн № 1 з горизонту НД-9, який демонструє тонке нашарування порід (приблизна глибина відбору зразка 1200 м)

© В'язовська Євгенія, Михалевич Ігор, Карпин Василь, Дучук Степан, 2025

За типовим деталізаційним комплексом ГДС, в який зазвичай входять методи бокового каротажного зондування (БКЗ), індукційного, бокового, мікробокового, нейтронного, акустичного, щільнісного та гамма-каротажів надати кількісну петрофізичну оцінку можна у пластах з товщиною >40 см (рис. 2). В окремих випадках, застосовуючи спеціальні дослідження з високою вертикальною роздільною здатністю (ядерно-магнітного резонансу, електричного мікроімеджера, діелектричного сканера), вдається кількісно охарактеризувати пласти з товщиною ~15 см (Cavalleri et al., 2021). Але ці методи доволі дорогі і не завжди дають однозначний результат, як і застосування спеціальних методик інтерпретації типового комплексу ГДС (Грицишин, 2012; Карпенко, & Локтев, 2001). Тому у вказаному типі розрізу дані ГТД можуть стати одним з вирішальних аргументів у виборі об'єкта до випробування.



Рис. 2. Вертикальна роздільна здатність методів ГДС, см (Rider, 2000)

Є достатньо багато факторів, які негативно впливають на точність даних станції ГТД. Наприклад, різні особливості режимів буріння і використання сучасних PDS доліт, які спричиняють те, що виділення перспективних горизонтів за даними газокаротажної станції є неточними (Когуч, & Сабат, 2007). Режим буріння, такі як "слайдування", ускладнюють виділення горизонтів за швидкістю буріння. Використання PDS доліт призводить до того, що порода повністю подрібнюється, а пісковик і алевроліт часто руйнується до окремих зерен, які легко пропустити при описі відібраної проби шлама. Тому для виділення потенційно продуктивних інтервалів найважливішою діагностичною ознакою є геохімічна інформація.

**Формулювання цілей статті.** На даний час є проблема недовивченості інформативності матеріалів станції ГТД, але в той самий час роль геолого-технологічних досліджень у загальному комплексі робіт у свердловині збільшується. Звісно, бажано проводити постійне оновлення техніки та технологій, але більш важливим є пошук нових методів інтерпретації даних, який нині майже не проводиться. Також потрібно створювати статистичні вибірки по певних комплексах окремих тектонічних зон, що даватиме розуміння про домінуючі тренди газових аномалій. Для цього в даній статті проведено дослідження з порівнянням продуктивності вже пробурених свердловин до даних станції ГТД за газовим каротажом. Особливо акцентовано увагу на співвідношення зміни абсолютного відсоткового вмісту газу в газоповітряній суміші, що надходить з бурового розчину під час циркуляції.

#### Методи

Для дослідження було взято свердловини, які вже перебувають в експлуатації і розташовані у Більче-

Волицькій зоні Передкарпатського прогину, а також кілька свердловин поза межами зони для порівняння. Кожна зі свердловин мала дебіт газу при випробуванні не менш як 10 тис. м³/добу. Метою було дослідити та встановити достовірність прогнозування газоносності колекторів за даними станції ГТД.

З даної вибірки були виключено свердловини, в яких гідростатичний тиск при первинному розкритті горизонтів, значно перевищував пластовий. Під час розкриття розрізу з великими репресіями на продуктивні пласти проходить витіснення газу від стінок свердловини. У промивальну рідину потрапляє тільки незначна частина газу і на кривій газопоказів фіксуються тільки значення, які не перевищують фонових значень. У цьому випадку пласти з кращими колекторськими властивостями будуть задавлені (продуктами-кольматантами бурового розчину), а низькопористі, з низькими фільтраційно-ємнісними властивостями, не зазнають такого впливу, що, спричиняє розгазування розчину і появи піків на газокаротажних діаграмах. Унаслідок дифузії газу на промивальну рідину низькопроникні пласти будуть відбиватися на діаграмах у вигляді зон із підвищеною газоносністю (Чорний, 2015).

Наступним кроком була перевірка природи походження кожної аномалії за добовим графіком станції геолого-технічних досліджень, з врахуванням часу відставання виходу газу з вибоєм (так званий lag time). В процесі буріння відбувається неперервний вимір концентрації газу в газоповітряній суміші, після деяких технологічних операцій підвищення абсолютного відсоткового значення газу може бути не пов'язано з пластовим газом. Для коректного проведення дослідження виключено газ свабіювання, газ після нарощування, рециркуляційний газ та місця, де вводили домішки нафтопродуктів у буровий розчин.

#### Результати

Газ свабіювання виникає у разі різкого підйому бурового інструмента над вибоєм свердловини при нарощуванні, спуско-підйомних операціях, шаблонуванні стовбура свердловини тощо. При підйомі інструмента тиск на привибійну зону пласта зменшується за рахунок ефекту підйому частини рідини, що є над інструментом, та часткового руйнування кірки, створеної буровим розчином. Залежно від швидкості підйому інструмента, його компоновки і параметрів бурового розчину ефект може бути достатнім для створення депресії і виклику припливу з пласта, який піддається впливу. Газові аномалії даного типу зазвичай характеризуються різким збільшенням та швидким затуханням газопоказників. Рециркуляційний газ виникає через погану очистку і дегазацію розчину, який виходить із свердловини, внаслідок чого він знову закачується в свердловину. Поява даної аномалії спостерігається на час повного циклу промивки від моменту реєстрації попередньої газової аномалії і відрізняється від неї більш пологою формою амплітуди і більшим відносним відсотком "важких" газів (C4–C5 – пропан-пентан). Для коректного проведення всіх наступних аналізів критично важливо відкинути всі аномалії, що викликані технологічними процесами і коротко описані вище.

Фонове значення газу – це значення концентрації газу в буровому розчині, яке спостерігається за відсутності продуктивних ділянок. Газова аномалія – це будь-яке значне збільшення виявленого газу, яке зазвичай пов'язане із зоною підвищеної пористості та проникності. **Коефіцієнт контрастності** (Ккон) – це співвідношення максимального значення в інтервалі аномалії до фоновому значення. Коефіцієнт контрастності може



коливатися в широких діапазонах. Пов'язано це з тим, що чим більша швидкість буріння, тим більша концентрація вуглеводнів на одиницю об'єму бурового розчину. Проте, з досвіду авторів, саме цей показник є найбільш інформативним в аналізі газових аномалій.

Для газових аномалій, інтервали яких збігались з інтервалами, в яких відбувалось первинне розкриття за допомогою перфорації і де в подальшому проводилась експлуатація, було розраховано коефіцієнти контрастності за методологією, коротко описаною вище.

На рис. 3, зокрема, зображено крос-плот за даними дебіту, коефіцієнта контрастності і початкових пластових тисків для 11 свердловин.

Головним висновком з аналізу крос-плоту є те, що свердловини з найбільшими дебітами під час подальшого випробування мали значення коефіцієнта контрастності в межах 4,3–6,3. Ймовірно, саме цей діапазон значень, за умов правильно підібраної густини бурового розчину та пластових тисків, близьких до гідростатичних, вказує на перспективність інтервалу, де ми спостерігаємо аномалію. Параметри пласта не завжди є ключовими. Оскільки, наприклад, коефіцієнт відкритої пористості у свердловині № 1 є в два рази більшим, ніж у свердловині № 4, а свердловина № 4 почала працювати лише після інтенсифікації пласта і саме діапазон коефіцієнта контрастності та додаткові позитивні

показники за каротажем дали змогу виділити цей об'єкт для перфорації, випробування та подальшої інтенсифікації. На рис. 4 і 5 показано планшети свердловин № 1, № 2, № 3, № 4 для кращої візуалізації відповідності газових аномалій з виділеними перспективними зонами та інтервалами перфорації, а в табл. 1 наведено інформацію про продуктивність кожної свердловини.

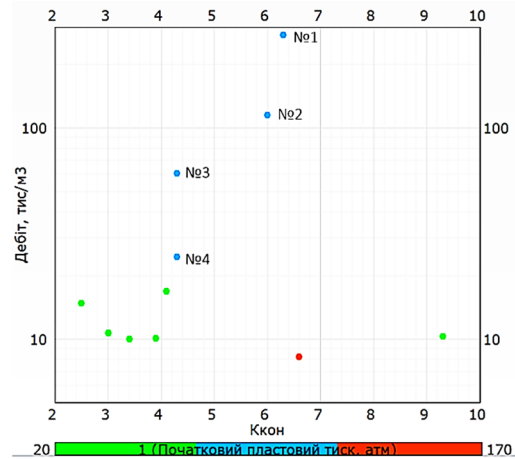


Рис. 3. Крос-плот даних початкових дебітів, коефіцієнта контрастності та початкових пластових тисків

Таблиця 1

Результати зіставлення коефіцієнта контрастності газових аномалій з дебітом при випробуванні початковим пластовим тиском, накопиченим видобутком, густинами розчину при бурінні та стратиграфічною одиницею

| № свердловини | Вік    | Густина БР, г/см³ | Ккон | Дебіт газу при випробуванні, тис. м³/добу | Накопичений видобуток, млн м³ | Початковий пластовий тиск, МПа |
|---------------|--------|-------------------|------|-------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 1             | Крейда | 1,09              | 6,3  | 276                                       | 41                            | 10,7                           |
| 2             | НД-8-9 | 1,085             | 6    | 115                                       | 70                            | 7,4                            |
| 3             | НД-9   | 1,08              | 4,3  | 61                                        | 14                            | 8,8                            |
| 4             | НД-9   | 1,09              | 4,3  | 24,5                                      | 17,7                          | 7,8                            |

Також за даними промислово-геофізичних досліджень наведено часткову петрофізичну характеристику з літологічною колонкою для ілюстрації. Чотири свердловини, що аналізуються, пробурені в межах глибин до 1500 метрів приблизно на однакових густинах бурового розчину, що добре усереднює нашу вибірку і відповідно

вказує на те, що продуктивні в майбутньому газові аномалії можуть характеризуватись коефіцієнтом контрастності в межах 4,3–6,3. Одне з аномальних значень коефіцієнта контрастності (понад 9) пов'язане і спродуковане значним пластовим тиском, що продемонстровано на рис. 3.

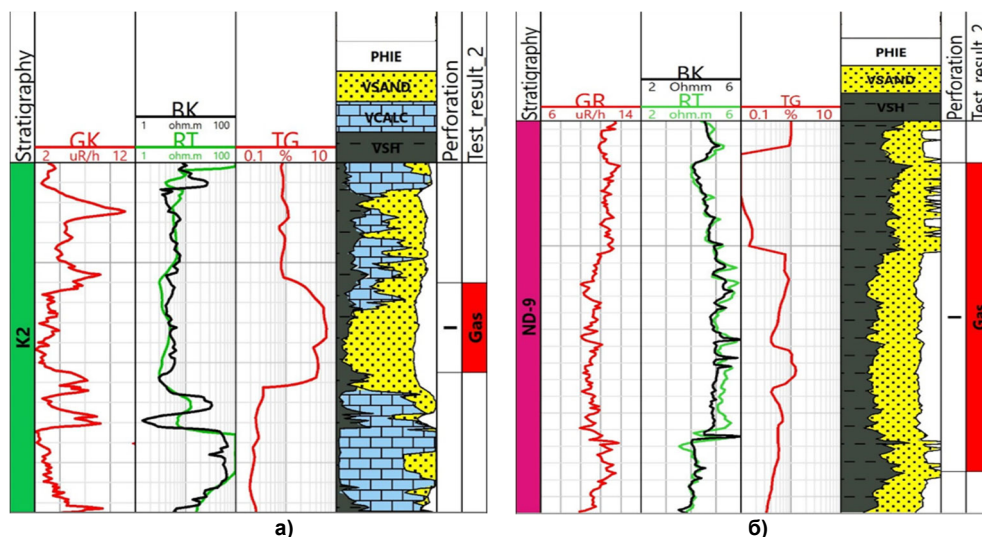


Рис. 4. Зведений планшет:

а) свердловина № 1; б) свердловина № 2.

ГК – гамма-каротаж; БК – питомий електричний опір за даними бокового каротажу;

RT – розрахунковий питомий електричний опір за даними індукційного каротажу; TG – сумарний вміст газу в буровому розчині за даними станції ГТД; PHIE – коефіцієнт відкритої пористості; VSAND – об'ємний вміст піску; VSH – коефіцієнт об'ємної глинистості

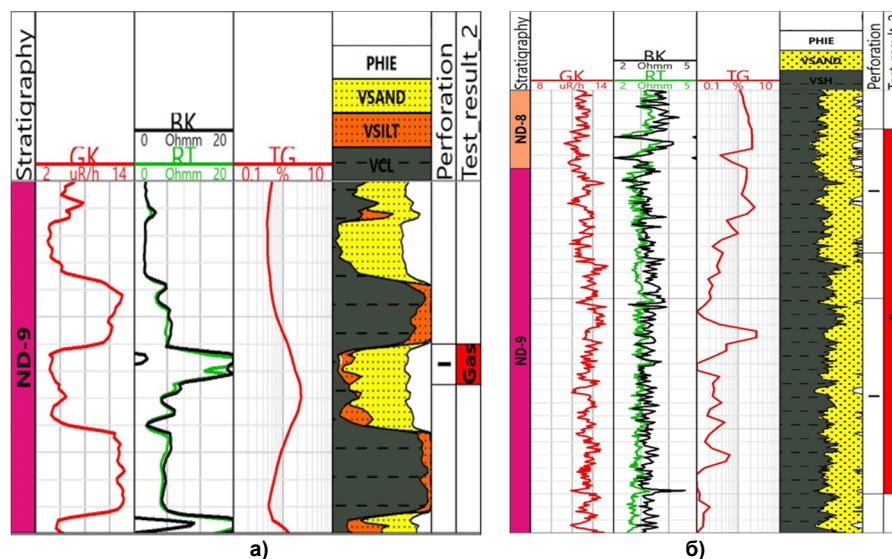


Рис 5. Зведений планшет:

а) свердловина № 3; б) свердловина № 4.

GK – гамма-каротаж; BK – питомий електричний опір за даними бокового каротажу; RT – розрахунковий питомий електричний опір за даними індукційного каротажу; TG – сумарний вміст газу в буровому розчині за даними станції ГТД; PHIE – коефіцієнт відкритої пористості; VSAND – об'ємний вміст пісковику; VSILT – об'ємний вміст алеволіту; VSH – коефіцієнт об'ємної глинистості

### Дискусія і висновки

Підсумовуючи, варто зазначити, що правильно оброблені та інтерпретовані дані газового каротажу, що отримують від станції ГТД, є одним з дуже важливих додаткових інструментів у прогнозуванні перспективних до випробування інтервалів. Інколи, в тонкошаруватому розрізі, у разі низької інформативності акустичних та електричних методів, газовий каротаж за підтримки лише даних каротажу ядерного-магнітного резонансу стає інструментом до виділення продуктивних горизонтів. Саме так відбувалось у випадку свердловини № 4. Варто також зазначити, що означений вище діапазон значень коефіцієнта контрастності в межах 4,3–6,3 інколи може характеризувати й пласти з газо-водняним насиченням, тому саме правильне калібрування всіх газових компонентів та обробка даних газового каротажу, а також комплексування його з даними промислово-геофізичних робіт, є ключовим елементом формування правильної стратегії випробування перспективних об'єктів у свердловині.

Вбачаємо необхідність у продовженні аналогічних досліджень у майбутньому. Очевидно, що збільшення статистичної вибірки отриманих результатів дасть змогу звузити діапазон розбіжності коефіцієнта контрастності, що притаманний для газонасичених інтервалів, та вкаже на критерії, за якими можна буде розділяти газонасичені та газо-водонасичені пласти. Однозначною є й потреба проведення аналогічних досліджень не лише у Більче-Волицькій зоні, а й в Бориславсько-Покутській, Скибовій, зоні Кросно та Закарпатському прогині, де слід очікувати цілком інші закономірності між досліджуваними аномаліями та продуктивністю свердловин.

**Внесок авторів:** Євгенія В'язовська – аналіз і обробка даних, методологія, написання (оригінальна чернетка); Ігор Михайлович – концептуалізація, аналіз і обробка даних, методологія, написання (перегляд і редагування); Василь Карпин – написання (перегляд і редагування), програмне забезпечення, формальний аналіз; Степан Дучук – програмне забезпечення, формальний аналіз.

### Список використаних джерел

- Грицишин, В. І. (2012). *Петрофізична характеристика колекторів нафтових і газових родовищ Карпатського регіону і Дніпровсько-Донецької западини*. Лілея НВ. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5042>
- Карпенко, О. М., & Локтев, А. В. (2001). Підвищення інформативності геофізичних досліджень свердловин при вивченні глинисто-піщаних розрізів тонкошаруватої будови. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, 1(1), 20–24. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/749>
- Коруч, Я. Р., & Сабат, Н. В. (2007). Контроль буримості гірських порід в процесі поглиблення нафтових і газових свердловин. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*, 1(15), 116.
- Прокопів, В. Й. (2004). *Фізико-геологічні моделі для визначення ємнісних характеристик порід колекторів складної будови за даними ГДС (на прикладі нафтових і газових родовищ Карпатського регіону та Північного Донбасу)* [Автореф. дис. ... канд. геол. наук, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу]. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4051>
- Чорний, О. М. (2015). Технологія розкриття пластів на рівновазі пластового та вибірного тисків під час буріння свердловин Передкарпаття. *Нафтогазова галузь України*, 3, 14–18. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ngu\\_2015\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ngu_2015_3_6)
- Cavalleri, C., Akashev, Y., Ahmad, S., Yuras, S., Karpyn, V., & Abdelatif, I. (2021). Advanced Formation Evaluation Approaches in Complex Low-Resistivity Thin Shale Sand Laminations: Success Case Histories from Western Ukraine. *SPE Eastern Europe Subsurface Conference*, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.2118/208513-MS>
- Rider, M. (2000). *The Geological Interpretation of Well Logs* (2nd ed.). Rider-French Consulting.

### References

- Cavalleri, C., Akashev, Y., Ahmad, S., Yuras, S., Karpyn, V., & Abdelatif, I. (2021). Advanced Formation Evaluation Approaches in Complex Low-Resistivity Thin Shale Sand Laminations: Success Case Histories from Western Ukraine. *SPE Eastern Europe Subsurface Conference*, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.2118/208513-MS>
- Chornyi, O. M. (2015). Technology of reservoir development at equilibrium of reservoir and bottom hole pressures during drilling of wells in the Carpathian Basin. *Oil and gas industry of Ukraine*, 3, 14–18 [in Ukrainian]. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ngu\\_2015\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ngu_2015_3_6)
- Hrytsyshyn, V. I. (2012). *Petrophysical characteristics of reservoirs of oil and gas deposits of the Carpathian region and the Dnieper-Donetsk basin: monograph*. Ivano-Frankivsk: Liliya NV [in Ukrainian]. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/5042>
- Karpenko, O. M., & Loktiev, A. V. (2001). Increasing the informativeness of geophysical well research when studying clayey-sandy sections of thin-layered structure. *Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, 1(1), 20–24 [in Ukrainian]. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/749>
- Kohuch, Y. R., & Sabat, N. V. (2007). Control of drill ability of rocks in the process of deepening oil and gas wells. *Scientific Bulletin of the Ivano-*

Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 1(15), 116 [in Ukrainian].

Prokopiv, V. Y. (2004). *Physical and geological models for determining the capacitive characteristics of reservoir rocks of complex structure according to GDS data (using the example of oil and gas fields of the Carpathian region and Northern Donbas)*. [The thesis ... Cand. Sci. (Geol.), Ivano-Frankivsk

National Technical University of Oil and Gas] [in Ukrainian]. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4051>

Rider, M. (2000). *The Geological Interpretation of Well Logs. Second Edition*. Sutherland: Rider-French Consulting.

Отримано редакцією журналу / Received: 01.04.25

Прорецензовано / Revised: 10.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Yevheniia VIAZOVSKA<sup>1</sup>, specialist

ORCID ID: 0009-0002-6652-5179

e-mail: yevheniia.viazovska@ugv.com.ua

Ihor MYKHALEVYCH<sup>2</sup>, Head of the G&G unit of Carpathian project

ORCID ID: 0009-0009-5786-8648

e-mail: ihor.mykhalevych@ugv.com.ua

Vasyl KARPYN<sup>2</sup>, leading engineer for rock physics research, geophysics department

ORCID ID: 0009-0003-3261-2634

e-mail: vasyi.karpyn@ugv.com.ua

Stepan DUCHUK<sup>3</sup>, Chief Geologist of the Western Ukrainian Geophysical Exploration Expedition

ORCID ID: 0009-0004-6384-7054

e-mail: duchuk@ukr.net

<sup>1</sup>UkrNDIgaz, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>JSC "Ukrgezvydobuvannya", Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>DGE "Ukrgeofizika", Lviv, Ukraine

## RELIABILITY OF PREDICTION OF GAS SATURATED RESERVOIRS IN BILCHE-VOLYTSYA ZONE USING THE MUDLOGGING STATION DATA

**Background.** The article analyzed the possibility of prediction reservoir saturation using the Mudlogging station unit. The key factors, which have negative influence on such studies, were analyzed. The inaccuracy of the mudlogging station data could be related to the specific drilling techniques and the use of PDC drilling bits. After all, these data are normally used for the preliminary evaluation of potential reservoir saturation. Then, these data need to be complexed with the result of petrophysical evaluation based on well log results. Taking into account the limited resolution of logging methods in the thin-layered Sarmatian section and in compacted Upper Jurassic carbonates, the decision on the test object is sometimes made based on core data and aforementioned gas readings. This article will discuss whether the mudlogging station data are relevant for solving such problems and how they statistically correlate with the test results.

**Methods.** The analysis of gas anomalies recorded by the mudlogging station included several stages: selection of wells for comparison of gas anomalies in which a commercial gas inflow was obtained based on petrophysical evaluation of reservoirs and formation pressure; consideration of the lag time of gas exit from the bottom hole, gas from the swabbing procedures, gas after drilling string build-up, recirculation gas, and places where petroleum product were added into the drilling fluid.

**Results.** A detailed analysis of gas anomalies was performed; petrophysical assessment of the reservoirs in the intervals of increased gas reading was performed; contrast ratio were calculated in perforated intervals in 11 wells.

**Conclusions.** The relevance of Mudlogging station data for preliminary identification of potentially gas-saturated horizons has been confirmed. Contrast ratio (Kkon) is an informative indicator in the analysis of gas anomalies. Kkon values within 4.3–6.3 indicate the possible gas saturated interval.

**Keywords:** geological, technological and geochemical research, gas, background gas ridings, contrast ratio, gas flow rate.

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

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



UDC 550.832

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.06>

Vagif SEIDOV, Prof.

ORCID ID: 0000-0002-3076-4621

e-mail: [vagif1439@gmail.com](mailto:vagif1439@gmail.com)

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Maleyka AGHAYEVA, Lecturer

ORCID ID: 0000-0002-3399-449X

e-mail: [meleykeagayeva12@gmail.com](mailto:meleykeagayeva12@gmail.com)

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL METHOD OF INFLUENCE TO INCREASE THE EFFICIENCY OF RESERVOIR EXPLORATION

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

**Background.** Even though the layers that make up oil and gas fields have different geological properties and, as well as different exploitation regimes applied in drilled wells, in most cases it is not possible to extract the expected volume of oil. To increase production, it is necessary to apply various physical effects to the layers. If the influence method is effective, it is possible to extract a certain amount of additional hydrocarbon from the layer. For this reason, selecting an effective influence method is considered to be one of the most important issues in the oil industry.

Many factors influence the decrease in oil production at the field, one of which is the presence of high-molecular components. These components form pseudocrystalline plug in the pores of the rock and clog them.

The article substantiates the effectiveness of using ultrasonic waves to clean rock pores from pseudocrystalline plug formed by high-molecular components (asphaltenes, resins). It determines the limiting values of ultrasonic vibration frequencies.

There was selection, justification, and determination of limiting values characterizing an effective method of action for cleaning rock pores from pseudocrystalline plugs formed by high-molecular components during the development of oil and gas fields.

The dependence of the influence of ultrasonic waves on the composition and density of fluids found in the pores of the rock, on the density of the rock, as well as on the liquid column settled in the well is established.

**Methods.** It is recommended that ultrasonic waves be used to destroy pseudocrystalline plugs in the pores of the rock formed by high-molecular components found in heavy oil during the development of oil and gas fields.

**Results:** as a result of the studies, it became known that for 1 m near the well, seismic waves with a frequency of 287 Hz should be used. For 10 m – 28.7 Hz; 100 m – 2.87 Hz; 200 m – 1.44 Hz; 300 m – 0.98 Hz; 400 m – 0.71 Hz; 500 m – 0.53 Hz. For an acoustic wave: from 0.33 to 525 Hz.

**Conclusions.** Selection of rational methods of influencing the formations, an acceptable method of influencing the formation when the flow rate of wells in the development of fields decreases or completely stops and to justify the effectiveness of the choice.

**Keywords:** development, layers, pores, influence methods, ultrasonic waves, etc.

### Background

The seismic wave influence technology (SWIT) results from many years of research and experiments to develop methods for efficient monitoring and control of geodynamic processes and to solve the problem of protecting the environment from negative environmental changes caused by large-scale industrial operations. The technology can be applied to virtually all geological structures and oil deposits in a wide range of depths, capacities, formation pressures, and water cut parameters. SWIT does not require additional injection of water or other chemical reagents during its application. Prevention of oil deposit destruction and their rehabilitation, increased field life, increased oil percentage in the produced fluid, increased formation pressure, and reduced environmental pollution make it possible to achieve and maintain for a long period the following economically and environmentally important results: - increased oil production by 15–35 %; - decreased current water cut in the produced fluid by 5–12 % for low- and medium-flow wells and up to 20 % for high-flow wells; - increasing the current oil recovery factor to 45 %; - increasing the final oil recovery factor to 70–80 % or more (Kerimov, & Kerimov, 2015).

The problems associated with the difficulties of oil movement in formations, and the nature of pseudocrystalline plug formation are considered, and ways of preventing their formation by wave action are shown. To overcome these difficulties, it is proposed to influence the formations with elastic waves, and a physical justification is given for elastic waves, which play a significant role in increasing oil recovery from formations. Analysis of the elastic effect on oil production showed that this method of action is relatively

simple and effective compared to other methods of increasing oil recovery (Seidov, 2003).

Many methods of wave and thermal wave (vibration, shock, pulse, thermoacoustic) action on an oil formation or its bottomhole zone are known. The main goal of the technology is to develop low-permeability isolated zones of a productive formation into development by influencing them with elastic waves that fade in highly permeable sections of the formation but spread over a significant distance and with sufficient intensity to excite low-permeability sections of the formation. By using such methods, it is possible to achieve a noticeable intensification of filtration processes in formations and increase their oil recovery in a wide range of amplitude-frequency characteristics of the impact modes. In this case, the positive effect of wave action is detected both in the directly treated well and, in individual cases, under appropriate treatment modes, in wells located hundreds or more meters from the source of pressure pulses (Ruzin, & Morozuk, 2014).

The geological, physical and physical-chemical properties of productive formations and fluids were analyzed. The objects were grouped and the centers of the grouping were determined, adjacent objects were selected for further research. The geological features of various groups of objects were analyzed, allowing for planning measures to improve the development system to increase oil recovery. An optimal set of technologies for increasing oil recovery and reducing water cut in formations was recommended, differentiated by the selected groups of fields. It was proposed to apply the recommendations to objects of each of the selected groups (Mukhametshin, Andreev, Dubinsky et al., 2016).

© Seidov Vagif, Aghayeva Maleyka, 2025

The large differences in water flooding efficiency of the models in different blocks of Beibu Gulf Oil Field, China, are taken as an example of water flow problems leading to low recovery factors. The cores of the W3IV formation in Well W and the L3III formation in Well B were taken for study. By combining dynamic nuclear magnetic resonance, constant rate mercury injection, and microplate visual model, the flow characteristics and factors affecting the water flow at the pore scale of these reservoirs were analyzed. The radii of the pores and throats were small, but the pore throat ratio was large and its distribution range was wide. For example, the pore volume of Well B samples was mainly controlled by the smaller throats. Under such conditions, the dominant flow path of the injected water is easily formed, and this adversely affects the volumetric sweep efficiency of water flooding. The mechanism of this is explained. This leads to the oil recovery in the medium and small pores reaching about 40 %, while it is less than 5 % in the large pores. As a result, the average oil displacement efficiency of well B was only 44.7 %, which was 22.3 % lower than that of well W. (Shen, Lei, Guo et al., 2017).

To increase oil production, it is necessary to influence the formation by methods with different physical characteristics. For this purpose, the application of the method of influence by ultrasonic waves was considered. The graphical dependence of Shvedov-Bingami (Fig. 1) is known, the dependence of the shear rate on the shear stress for the rheological model of the body. When creating shear stress in the medium, there is no inflow; as the medium behaves like a liquid with viscosity (1) (Seidov, 2003)

$$\eta = \frac{d\tau}{d\gamma} \quad (1)$$

where,  $d\tau$  is differential value of the shear rate, and  $d\gamma$  is differential value of the shear stress.

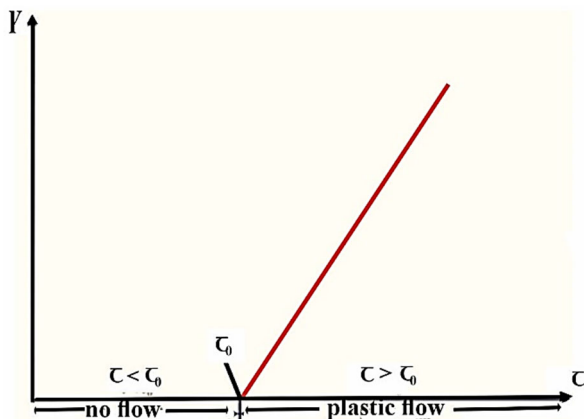


Fig. 1. Shvedov – Bingham dependence.  
 $\gamma$  – is the shear rate;  $\tau$  – shear stress

Such media are called rigid elastic and at  $\tau > \tau_0$  there is a plastic inflow. The value is called the ultimate shear stress and cannot create a fluid inflow. This model describes the pattern of hydrocarbon movement in the pore space of rocks.

During reservoir operation, in the bottomhole zone of the reservoir, in most cases, pseudocrystalline plug formed by high-molecular components clog the pores of the rocks. As a result, permeability in this zone decreases sharply, and the well flow rate drops to zero (Fig. 2) (Seidov, 2012).

It is known that the flow rate depends on the permeability of rocks lying within the near-wellbore layer with a thickness of 1.0 m. It is this layer that determines the productivity of the well and its hydrodynamic drainage/flow. In a radius of 1 m of the near-wellbore zone of the formation, the created

pressure from different sources increases by several megapascals. In this case, the pressure gradient can be determined by the following formula (2):

$$gradP = A_0/L, \quad (2)$$

where,  $L$  is the wavelength;  $A_0$  is the amplitude of the acoustic pressure.

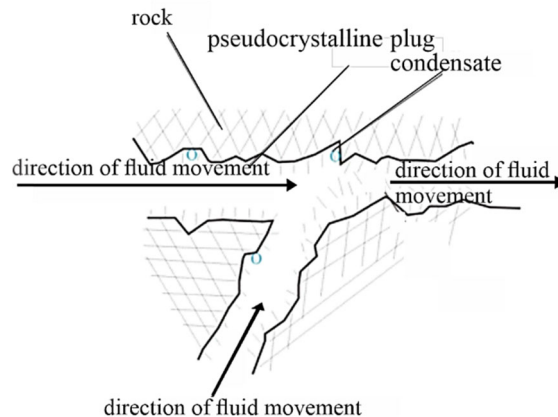


Fig. 2. Scheme of creating plugs in porous rocks

When the formations are affected by emitted wave sources (located in the well), stress of different intensities is created at various points near the wells: near the source; in the rocks located near the wellbore; 1 m from the wellbore. Therefore, it was concluded that when influencing the strata with waves, the radius of their propagation can be increased by several hundred meters by selecting the necessary frequency values. The ultrasonic waves used in the impact correspond to the frequency ranges of acoustic and seismic waves, therefore the analysis of their implementation is studied separately.

#### Methods

Impact of wave impact. The following effects were revealed during the acoustic wave impact on the formation: vortex motion of the wave in the formation pores; "heating" of the liquid filling the rock pores under the influence of the waves; turbulent motion of the liquid in the rock pores; decrease in oil viscosity. The study showed that all of the above mentioned phenomena cannot co-occur; in this case, it is necessary to create an intense acoustic field, because, without this, it is impossible to increase the impact field. Indeed, during intense impact, resonance occurs in the waves propagating in the rock pores, which ensures its deeper penetration. At the same time, as noted above, the liquid in the pores begins to heat up, after which the shape of the liquid flow becomes turbulent, as a result of which the stress value before the impact is high. After the start of movement in the pores, the temperature field created by the wave energy creates conditions for reducing the viscosity of oil. The analysis showed that the mechanism of acoustic impact is somewhat different, which is associated with the nonlinear rheological form of hydrocarbon behavior. Studying the stress field and its velocity in a nonlinear medium is much more difficult than in a linear medium. To determine the acoustic impact on the formation, we will consider a cylindrical pore of rocks of radius with a rigid-plastic medium placed in it. The flow is not achieved under the condition (Seidov, 2012):

$$\frac{\gamma}{2} gradP < \tau_0. \quad (3)$$

The reason is that the pressure gradient is directed along the pore axis. Taking into account some conditions and

transforming inequality (3), we obtain the following inequality (4) (Seidov, 2012)

$$\omega^2 A_0 > \left( \frac{\rho_1 + \rho}{\rho_0} \right) g, \quad (4)$$

where,  $\rho_1$  is the density of the liquid.

Acoustic impact can be carried out by both transverse and longitudinal waves. At this time, the density of acoustic energy must satisfy the equality (Seidov, 2012):

$$W = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A_0^2. \quad (5)$$

Using the formula (5), the value of the density of acoustic energy was calculated for different values of quantities  $\rho, \omega, A_0$  (Table 1).

Looking at the calculated values, it can be seen that the density of acoustic energy changes in a very large range. During the impact on the formation, the wave amplitude and the density of acoustic energy must be proportional to the square of the frequency. Therefore, according to the volume of the formation, it is necessary to increase the frequency so that it does not exceed the attenuation of the wave in numerical value.

Table 1

| Value of acoustic energy density |               |                             |           |                           |
|----------------------------------|---------------|-----------------------------|-----------|---------------------------|
| №                                | $\omega$ (Hz) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | A (m)     | W (Joule/m <sup>3</sup> ) |
| 1                                | 0.033         | 1900                        | 0.0000013 | 0.0000013                 |
| 2                                | 0.04          | 1900                        | 0.0000013 | 0.000002                  |
| 3                                | 0.0525        | 1900                        | 0.0000013 | 0.000034                  |
| 4                                | 0.33          | 1900                        | 0.0000013 | 0.00013                   |
| 5                                | 0.4           | 1900                        | 0.0000013 | 0.0002                    |
| 6                                | 0.525         | 1900                        | 0.0000013 | 0.00034                   |
|                                  |               |                             |           |                           |
| №                                | $\omega$ (Hz) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | A (m)     | W (Joule/m <sup>3</sup> ) |
| 1                                | 3.3           | 1900                        | 0.0000013 | 0.013                     |
| 2                                | 4             | 1900                        | 0.0000013 | 0.02                      |
| 3                                | 5.25          | 1900                        | 0.0000013 | 0.034                     |
| 4                                | 33            | 1900                        | 0.0000013 | 1.3                       |
| 5                                | 40            | 1900                        | 0.0000013 | 2.0                       |
| 6                                | 52.5          | 1900                        | 0.0000013 | 3.4                       |
|                                  |               |                             |           |                           |
| №                                | $\omega$ (Hz) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | A (m)     | W (Joule/m <sup>3</sup> ) |
| 1                                | 330           | 1900                        | 0.0000013 | 134                       |
| 2                                | 400           | 1900                        | 0.0000013 | 200                       |
| 3                                | 525           | 1900                        | 0.0000013 | 340                       |
| 4                                | 1050          | 1900                        | 0.0000013 | 1362                      |
| 5                                | 6600          | 1900                        | 0.0000013 | 53196.6                   |
| 6                                | 8000          | 1900                        | 0.0000013 | 7904000                   |
|                                  |               |                             |           |                           |
| №                                | $\omega$ (Hz) | $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) | A (m)     | W (Joule/m <sup>3</sup> ) |
| 1                                | 66000         | 1900                        | 0.0000013 | 5379660                   |
| 2                                | 80000         | 1900                        | 0.0000013 | 7904000                   |
| 3                                | 105000        | 1900                        | 0.0000013 | 1315880                   |
| 4                                | 660000        | 1900                        | 0.0000013 | 537966000                 |
| 5                                | 800000        | 1900                        | 0.0000013 | 790400000                 |
| 6                                | 1050000       | 1900                        | 0.0000013 | 131588000                 |

The limiting value of the frequencies of waves used for acoustic impact on rocks of any lithological composition (taking into account its density, pore volume, and fluid composition) are determined in the range 0.33–525 Hz, at which the destruction of plugs in the capillaries of rocks is possible.

Acoustic waves were used in the study. For this purpose, an analysis was carried out and wave sources were selected: vortex sources (Fig. 3) (Seidov, 2012).

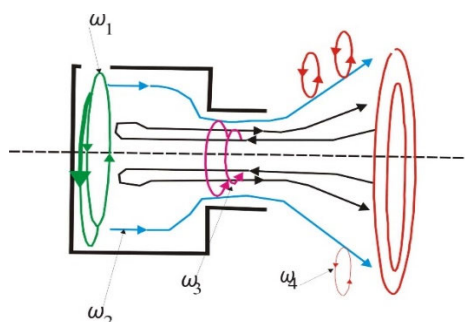


Fig. 3. Schematic structure of the operating principle of a vortex wave source.  $\omega_1$  – wave frequency at the input;  $\omega_2$  – wave frequency inside the chamber;  $\omega_3$  – wave frequency at the output;  $\omega_4$  – wave frequency in front of the chamber

In our opinion, hydrodynamic sources can be considered to be the most optimal equipment for creating elastic waves in a high-pressure and temperature environment. The most convenient of these are vortex sources. In our opinion, taking into account the characteristics of oil and gas fields of Azerbaijan, the use of vortex sources in the following structure is more convenient (Fig. 3). The liquid flow from the inlet to the vortex chamber is pumped by a pump, since the outlet of the chamber is perpendicular to the part into which the liquid enters, the liquid entering from the inlet changes direction by hitting the inner part of the chamber located perpendicular to the direction of its movement with great speed, and in this part of the chamber a liquid rotation occurs, the frequency of which is equal to  $-\omega_1$ . Due to the action of centrifugal force, the pressure along the axis of the chamber decreases, a counter-flow is formed in a certain ratio of its values in the chamber and the head. In the chamber, a precessional movement of the liquid (an attempt to change the direction of the rotation axis of the liquid as a result of the action of the torque) occurs, the frequency of which is also equal to its steady value. As a result, two flows are formed at the outlet, the directions of their rotation coincide, but their rectilinear movements are in opposite directions, which leads to a change in the cross section of the flow, and in this case, the resulting frequency changes.



In addition, the liquid, which is in vortex motion, enters a stationary medium and, as a result, creates a frequency oscillatory motion (expansion). This value, in our opinion, can be expressed by the following formula (6) (Seidov, 2012)

$$\omega_4 = \frac{r^2 \Delta k Q g}{2\pi r_1 c^2 \Delta s} \quad (6)$$

Here,  $r$  – is the radius of the hole through which water enters the chamber;  $r_1$  – is the radius of the hole through which water exits;  $Q$  – is the water flow rate injected into the chamber;  $c$  – is the velocity of the liquid exiting the chamber;  $\Delta k$  – is the device coefficient (the difference between the diameters of the outlet and inlet parts);  $g$  – is the gravitational field strength;  $\Delta s$  – is the difference between the inlet and outlet fields. Also, the numerical difference between the frequencies obtained is as follows:  $\omega_4 > \omega_1 > \omega_2 > \omega_3$ . Indeed, if we analyze the entry and exit of the liquid into the chamber, it turns out that it is equal to the value of the smallest frequency. Thus, in other cases, the areas in which the liquid moves are numerically large. However, at the exit of the chamber, this area is numerically the smallest compared to the others, this is done to maximize the numerical value of the liquid velocity (the law of communicating vessels).

Limit values of the frequency of acoustic waves impact on rocks of different lithological composition are determined: from 0.33 to 525 Hz (Table 1).

It is preferable to place such sources mainly in injection wells. This is due to the fact that the sources are not repaired for a long time.

**Impact of seismic waves.** To trace the propagation of seismic waves in the medium, the results of complex studies

were considered, and it was found that the attenuation of waves of different frequencies in layers with different physical properties (in a porous medium, filling it with gas, oil, and water) can be different. Separate researchers explained this feature of wave propagation by its non-linearity. Indeed, the study of emitting seismic sources and receivers remote from it at different distances, which register the spectrum of signals, showed that high-frequency waves are absorbed to a large extent. They become the reason for the formation of signals on the spectrum of registered waves, the frequency of which sharply distinguishes them from each other in layers with different petrophysical characteristics. The amplitude of the resulting waves differs by a large amount from the amplitude of the neighboring spectrum of the signal frequency. Scientists called these signals waves of the "dominant" frequency.

Carrying out different transformations, we get a shortened form of the frequency of the "dominant" waves (7) (Seidov, 2012):

$$\omega_{\text{домин}} = \frac{\vartheta_i \beta_i}{K_i}, \quad (7)$$

where,  $\vartheta_i$  – the propagation velocity of the surface wave in the rocks;  $\beta_i = \sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$  – this is an immeasurable quantity and is determined by the physical and mechanical properties of the rocks;  $K_i$  – the distance of deviation from the wall of the well.

The frequency of waves when acting on the layer is determined for different sizes for carbonate and terrigenous rocks (Table 2).

Calculated frequency of seismic waves

Table 2

| Lithological composition | Porosity (%) | $\vartheta \cdot 10^2$ , (m/sec) | $\beta$ | $\omega$ , (Hz) |         |      |       |        |
|--------------------------|--------------|----------------------------------|---------|-----------------|---------|------|-------|--------|
|                          |              |                                  |         | $R_i$ , (m)     |         |      |       |        |
|                          |              |                                  |         | 0.0005 m        | 0.005 m | 1 m  | 10 m  | 100 m  |
| Carbonate rocks          | 6            | 60                               | 0.001   | 12000           | 1200    | 6    | 0.6   | 0.06   |
|                          |              |                                  | 0.01    | 120000          | 12000   | 60   | 6     | 0.6    |
|                          |              |                                  | 0.1     | 1200000         | 120000  | 600  | 60    | 6      |
|                          | 15           | 45                               | 0.001   | 9000            | 900     | 4.5  | 0.45  | 0.045  |
|                          |              |                                  | 0.01    | 90000           | 9000    | 45   | 4.5   | 0.45   |
|                          |              |                                  | 0.1     | 900000          | 90000   | 450  | 45    | 4.5    |
|                          | 25           | 38                               | 0.001   | 7600            | 760     | 3.8  | 0.38  | 0.038  |
|                          |              |                                  | 0.01    | 76000           | 7600    | 38   | 3.8   | 0.38   |
|                          |              |                                  | 0.1     | 760000          | 76000   | 380  | 38    | 3.8    |
| Terrigenous rocks        | 5            | 52.5                             | 0.001   | 10500           | 1050    | 5.25 | 0.525 | 0.0525 |
|                          |              |                                  | 0.01    | 105000          | 10500   | 52.5 | 5.25  | 0.525  |
|                          |              |                                  | 0.1     | 1050000         | 105000  | 525  | 52.5  | 5.25   |
|                          | 15           | 40                               | 0.001   | 8000            | 800     | 4    | 0.4   | 0.04   |
|                          |              |                                  | 0.01    | 80000           | 8000    | 40   | 4     | 0.4    |
|                          |              |                                  | 0.1     | 800000          | 80000   | 400  | 40    | 4      |
|                          | 30           | 33                               | 0.001   | 6600            | 660     | 3.3  | 0.33  | 0.033  |
|                          |              |                                  | 0.01    | 66000           | 6600    | 33   | 3.3   | 0.33   |
|                          |              |                                  | 0.1     | 660000          | 66000   | 330  | 33    | 3.3    |

The knowledge of magnitudes when the stratum is affected by seismic waves is studied. Despite the presence of numerous values characterizing such waves, it is impossible to change their values. It is known that for the propagation of waves in the medium over long distances, its reflection from the medium should be equal to the minimum value. i.e. All the energy of the wave must be spent at its farthest distance.

It should be noted that as a result of the diversity of the skeletal structures of the species, the waves propagating in them can reach different distances. As is known, the particles that make up the rock are separated by clay, which once again confirms the connection between the amount of

clay in the rock and its wave reflection coefficient. A valid study of the relationship between two parameters (coefficient of clay) and (coefficient of reflection) for each depth was divided into four groups. The reflection coefficient corresponds to the null value. Hence, it follows that clay soil negatively influences the spread of waves. Therefore, in the pure layers of the collectors, the clay "equals to zero", in the propagation of seismic waves, not a skeleton, but a liquid that fills the pores creates an obstacle, which is necessary for the impact of seismic waves on the environment. This peculiarity of liquid bones has a thermal and mechanical effect on the pseudocrystalline plugs formed in the powder

rocks, contributing to their destruction. The second task is also to clarify the influence of waves of different frequencies. For this purpose, using velocity values and dimensionless values, reflecting the properties of layers based on formula (7), the required frequencies for wave propagation at distances of 100, 200, 300, 400, and 500 m were calculated. Following the obtained values, it was concluded that it is necessary to reduce the frequency of waves every 100 m to ensure the propagation of waves over long distances. As a result of the conducted research, it became known that during the impact on the well, it is necessary to apply waves with a frequency of 287 Hz. The calculation is carried out for the propagation of waves over long distances. For example, at 10 m – 28.7 Hz.; 100 m – 2.87 Hz.; 200 m – 1.44 Hz.; 300 m – 0.98 Hz.; 400 m – 0.71 Hz.; 500 m – 0.53 Hz.

Seismic waves were used in the research process. Different sources are used for the excitation of waves. Therefore, it is necessary to consider the selection of the most popular sources of waves. For this purpose, an analysis was conducted and effective sources of waves were selected: electrohydraulic sources with "explosive" wires.

**Application.** Oil and gas fields of Azerbaijan are considered to be one of the most complex structures in the field of world practice.

This method of impact was not widely used in the oil and gas fields of Azerbaijan. The effect of ultrasonic waves was mainly applied to offshore oil and gas fields. For example, in 4 wells at the Gunashli field, in the 1st well in Duvanny Deniz, in 2 wells in Khara-Zira, in the 1st well in Neft Dashlari, in the 1st well in Pirallahi, etc.

We will consider the sequence of application of this method in the oil and gas sector of Azerbaijan (Fig. 4. Neft Dashlari field).

About 60 % of the liquid flowing out of the well is oil, which is about 0.37 tons/day. The layer is irradiated by a wave source released in front of the filter. During the first month after exposure to waves, the fluid intake increased rapidly, but in recent years, the fluid intake has stabilized with small jumps.

The next example concerns the Gunashli field (Fig. 5). The Gunashli field differs from other fields in its high production capacity. Thus, the daily liquid production in the field's exploitation wells is numerically very large. Therefore, the decrease in the debit is quickly noticeable. The well given in the example produced approximately 90 tons of oil per day during the exploitation period.

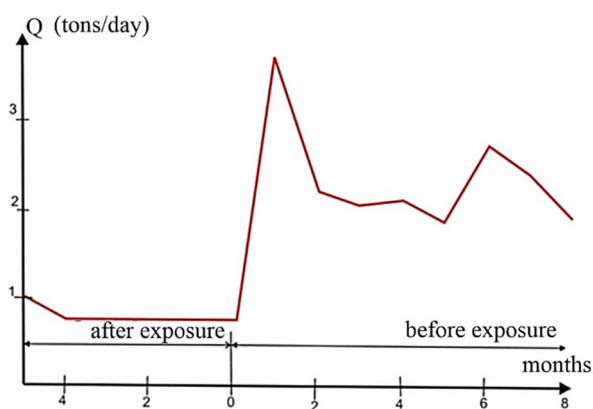


Fig. 4. Dynamics of liquid flow before and after exposure to ultrasonic waves

A two-fold decrease in production was noted in this well. Despite the repair work carried out in the well, it was not

possible to restore the previous production. Therefore, two intervals opened in the well were affected by waves. At the initial stage of the impact, the production decreased slightly and the amount of colloidal particles in the liquid increased. After a certain period, the dynamics of liquid production changed in the direction of increase, and this continued, surpassing the previous limit. The duration of the impact in this well exceeded approximately two years.

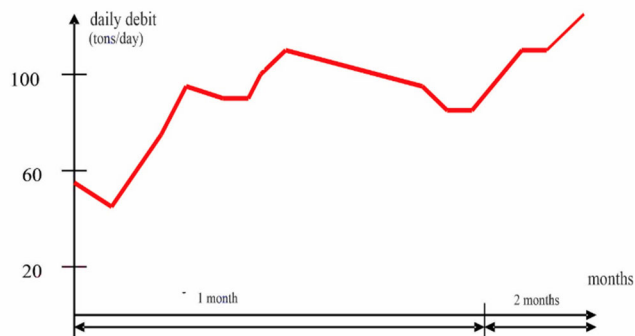


Fig. 5. Dynamics of the produced fluid. Guneshli field, well 143

### Discussion and conclusions

Thus, generalizing the results of the research works, with the purpose of effective application of ultrasonic impact on layers of oil and gas deposits of Azerbaijan, the following recommendations can be given: in addition to impact, the oil saturation of layers should be determined; the number of high-molecular components in the extracted liquid is determined; the angle of the layers has to be taken into account; the properties of wave propagation in the medium should be studied (ie, specifying the values affecting it: the strength of the skeleton, the porosity coefficient, the composition of the liquid filling the pores, etc.); it must be determined whether there are violations and ruptures in the tectonic zone exposed to the influence of ultrasonic waves.

The limit values of the frequencies of the waves of impact on the rocks of different lithological composition are determined:

a) for acoustic waves – 0.33–525 Hz;

b) for seismic waves - at a distance of 1 meter around the well 287 Hz, 10 meters – 28.7 Hz, 100 meters – 2.87 Hz, 200 meters – 1.44 Hz, 300 meters – 0.98 Hz, 400 meters – 0.71 Hz, 500 meters – 0.53 Hz.

As a result of such an impact, the resulting productivity is 2–8 times higher than in injection wells (2–3 times higher in terrigenous collectors with porosity of 5–8 %, 2–3 times higher in fractured carbonate rocks productivity of wells increases 3–4 times). These figures are slightly different for oil and gas fields in Azerbaijan. Thus, the increase in productivity compared to injection wells is 1.5–2.3 times higher and this is connected with the complex geological structure.

The developed method can be widely used in all fields, considering the deposit geology. In other words, research work in this direction must be adapted to the deposit geology.

**Authors' contribution:** Vagif Seidov – conceptualization, methodology, writing (original draft), formal analyses; Maleyka A Aghayeva – data validation, writing (review and editing).

### References

- Kerimov, I. G., & Kerimov, S. I. (2015). *Seismic wave impact technology for intensification of oil production and oil recovery* [in Russian]. [Керимов, И.Г., & Керимов, С.И. (2015). *Технология сейсмических воздействий для интенсификации нефтедобычи и нефтеотдачи*. 1–3] <http://tech.ru.seismotechglobe.com/files/T-SWI,-rus,-,-3-p,-,-03.03.2015.pdf>

Mukhametshin, V. V., Andreev, V. E., Dubinsky, G. S., & others. (2016). The usage of principles of system geological-technological forecasting in the justification of the recovery methods. *SOCAR Proceedings*, 3, 46–51. <https://proceedings.socar.az/az/journal/46>

Ruzin, L. M., & Morozuk, O. A. (2014). *Methods of enhanced oil recovery (theory and practice) Study guide*. (p.127) [in Russian]. [Ружин, Л. М., & Морозук, О. А. (2014). *Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика)*. [http://bkpt.osu.ru/ckeditor\\_assets/attachments/3334/metodi.pdf](http://bkpt.osu.ru/ckeditor_assets/attachments/3334/metodi.pdf)

Seidov, V. M. (2003). On the application of the acoustic method to increase the production of oil-saturated formations. *Oil industry of Azerbaijan*, 9, 28–31. [in Azerbaijani]. [Сейдов В.М. (2003). О применении акустического метода

для увеличения добычи нефтенасыщенных пластов. *Нефтяная промышленность Азербайджана*, 9, 28–31].

Seidov, V. M. (2012). *Possibility of controlling the exploitation of oil and gas with geophysical methods and perspectives of their development (on the sample of Azerbaijan's field)*. (Doctor of Sciences scientific dissertation). (p.303) [in Azerbaijani].

Shen, R., Lei, X., Guo, H. K., & others. (2017). The influence of pore structure on water flow in rocks from the Beibu Gulf oil field in China. *SOCAR Proceedings*, 3, 32–38. <https://proceedings.socar.az/az/journal/50>

Отримано редакцією журналу / Received: 14.03.25

Прорецензовано / Revised: 26.03.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Варіф Мірґамза СЕІДОВ, проф.

ORCID ID: 0000-0002-3076-4621

e-mail: vagif1439@gmail.com

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

Малейка Ага Алі АГАСЕВА, викладач

ORCID ID: 0000-0002-3399-449X

e-mail: meleykeagayeva12@gmail.com

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДУ ВПЛИВУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗВІДКИ РОДОВИЩ

**В с т у п .** Шари, які утворюють нафтові та газові родовища, мають різні геологічні властивості, а також різні режими експлуатації пробурених свердловин. Водночас добути очікуваний обсяг нафти не завжди вдається. Для збільшення видобутку потрібно застосовувати додаткові алгоритми. При знаходженні ефективного методу впливу з пласта можна отримати певну кількість додаткових вуглеводнів. З цієї причини вибір такого методу вважається одним із найважливіших питань у нафтовій промисловості.

**М е т о д и .** Рекомендовано використовувати ультразвукові хвилі для руйнування псевдокристалічних пробок у порах гірської породи, утворених високомолекулярними компонентами, що містяться у важкій нафті при розробці нафтових та газових родовищ.

**Р е з у л ь т а т и .** На зниження видобутку нафти у межах родовища впливає наявність високомолекулярних компонентів. Ці компоненти утворюють псевдокристалічні пробки в порах гірської породи та закупорюють їх. У статті обґрунтовано ефективність використання ультразвукових хвиль для очищення пор гірської породи від псевдокристалічних пробок, утворених високомолекулярними компонентами (асфальтенами, смолами). Визначено граничні значення частот ультразвукових коливань. Вибір, обґрунтування та визначення граничних значень є ефективним способом впливу. Встановлено залежність впливу ультразвукових хвиль від складу та щільності флюїдів, що містяться в порах гірської породи, від щільності породи, а також від стовпа рідини, що накопичується у свердловині. В результаті проведених досліджень стало відомо, що на 1 м поблизу свердловини слід використовувати сейсмічні хвилі із частотою 287 Гц. На 10 м–28,7 Гц; 100 м–2,87 Гц; 200 м–1,44 Гц; 300 м–0,98 Гц; 400 м–0,71 Гц; 500 м–0,53 Гц. Для акустичної хвилі: від 0,33 до 525 Гц.

**В и с н о в к и .** Аргументовано вибір раціональних методів впливу на пласти, зокрема таким методом є визначення впливу на пласт при зниженні або повній зупинці дебіту свердловин при розробці родовищ.

**К л ю ч о в і с л о в а :** розробка, пласти, пори, методи впливу, ультразвукові хвилі.

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

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



УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.07>

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

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

Станіслав ГОРОШКОВ<sup>1</sup>, студент  
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165  
e-mail: stas20055008@gmail.com

Тургай ДІНДАРОГЛУ<sup>3</sup>, д-р наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0003-2165-8138  
e-mail: turgay.dindaroglu@ktu.edu.tr

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний університет "Києво-Могилянська академія", Київ, Україна

<sup>3</sup>Технічний університет Караденіз, Трабзон, Туреччина

## КОМПЛЕКСНА МОДЕЛЬ ВМІСТУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ ТА МАГНІТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ ТА ДОННИХ ВІДКЛАДІВ ОЗЕР ЗАПОВІДНИКА "ХОРТИЦЯ"

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

**Вступ.** Природні та антропогенно змінені комплекси природно-заповідного фонду острова Хортиця зазнають значного впливу внаслідок людської діяльності, техногенних процесів і військових факторів. Важливо також враховувати трансформації, пов'язані з регулюванням течії річки Дніпро, експлуатацією Дніпрогесу та наслідками руйнування Каховського водосховища. Усі ці чинники спричинили суттєві зміни у водному режимі та структурі ландшафтів території. Основною метою запропонованого дослідження є вивчення змін природних і антропогенних ландшафтів заповідника "Хортиця" шляхом аналізу магнітних властивостей та вмісту токсичних хімічних елементів (зокрема, важких металів) у донних відкладах осушених озер, що виникли внаслідок руйнування Каховської греблі, а також у ґрунтовому покриві.

**Методи.** Лабораторні вимірювання магнітної сприйнятливості проводили за допомогою капамістка KLY-2. Далі визначали питому магнітну сприйнятливість  $\chi$  ( $10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг), нормалізуючи отримані значення на масу зразка. Вміст хімічних елементів визначали методом рентгенофлуоресцентного аналізу (XRF), використовуючи прилад ElvaX Pro — лабораторний РФА-аналізатор, здатний виявляти елементи в діапазоні від Na (11) до U (92).

**Результати.** Значення магнітної сприйнятливості в досліджених зразках ґрунтів є надзвичайно високими ( $\chi=97\text{--}572\times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг). Зафіксовано істотне перевищення ГДК для цинку (у 2–5 разів), хрому (у 20–30 разів), міді (у 1,1–3 рази), нікелю (у 4–10 разів) та кобальту (у 3–4 рази). Подібні показники, ймовірно, пов'язані з наслідками процесів горіння, а також з антропогенним впливом, зокрема промисловим забрудненням, яке походить із Запоріжжя. Водночас характер змін магнітної сприйнятливості та її кореляція із вмістом важких металів донних відкладів у межах озер Хортиці свідчить про інші закономірності. Це дає змогу зробити висновок про існування механізму формування підвищеного магнітного сигналу, що пов'язаний із переважанням речовини літогенного походження, ймовірно принесеної з навколишніх кристалічних порід Українського щита.

**Висновки.** Донні відклади озер Хортиці становлять надзвичайно цінний природний матеріал для ретроспективного аналізу формування магнітних частинок, накопичення важких металів і уламкових гірських порід різного походження з метою оцінки як природного, так і антропогенного впливу на екосистеми заповідника "Хортиця" впродовж останніх кількох століть.

**Ключові слова:** донні відклади, ґрунти, важкі метали, забруднення, магнітна сприйнятливість.

### Вступ

Природні та штучні комплекси природно-заповідного фонду острова Хортиця перебувають у зоні підвищеного антропогенного, техногенного та військового впливів. Крім того, важливим є врахування зміни функціонування р. Дніпро, Дніпрогесу та руйнування Каховського водосховища. Окреслені дії призвели до суттєвих змін водних і ландшафтних умов.

Головною метою запропонованих досліджень є аналіз трансформацій природних і антропогенних ландшафтів заповідника "Хортиця" через вимірювання магнітних характеристик та вмісту токсичних хімічних речовин (зокрема, важких металів) у донних відкладах осушених озер, що сформувалися після руйнування Каховської греблі, а також у ґрунтах. Проводиться типізація природного та антропогенного впливу на різні ландшафти острова, лісових, лучних, прибережних, техногенних і гідрологічних, у тому числі з використанням магнітних вимірювань та інших фізико-хімічних властивостей ґрунтів для оцінки масштабів і особливостей змін екосистеми. У нашій попередній роботі (Меньшов та ін., 2025) отримано результати, що показники магнітної сприйнятливості ( $\chi$ ,

MS) як у донних відкладах, так і в ґрунтах демонструють високі значення ( $\chi=100\text{--}300\times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/кг), що у 1–5 разів перевищують типові рівні для звичайних і типових чорноземів, основних автоморфних ґрунтів Запорізького регіону. Водночас піщані ґрунти острова Хортиця мають магнітну сприйнятливості у 10–20 разів вищу, ніж аналогічні ґрунти борових терас України (Menshov, & Sukhorada, 2012). Встановлено, що високі показники магнітної сприйнятливості в донних відкладах озер та піщаних ґрунтах лісових ділянок заповідника "Хортиця" пов'язані з накопиченням частинок, принесених у результаті вивітрювання гірських порід кристалічного фундаменту, що оточує острів. Йдеться про Середньодніпровський тектонічний блок Українського щита, розташований у межах Дніпропетровської та Запорізької областей, який представлений граніто-гнейсами, метабазами, сланцями та залізними породами. Проте роль антропогенного забруднення від урбанізованого середовища Запоріжжя (Bondar et al., 2024) порівняно незначна. Важливим при цьому є врахування небезпечних геологічних процесів території розташування критичної інфраструктури (Vyzhva et al., 2010).

© Меньшов Олександр, Горошкова Лідія, Горошков Станіслав, Діндароглу Тургай, 2025

Магнітна сприйнятливість вимірюється на озерних відкладеннях і використовується як проксі для ідентифікації джерел надходження уламкового матеріалу, ерозії ґрунту, для знаходження кореляційних зв'язків між осадовим матеріалом різних озер одного геологічного комплексу (Blumentritt, & Lascau, 2015). Ретроспективний аналіз зміни магнітної сприйнятливості, вмісту органічного вуглецю, азоту, As, Cd, Hg, Pb, хлорорганічних пестицидів на прикладі озер Байяндянь (Guo, Huo, & Ding, 2015), які були використані для аналізу змін водного середовища внаслідок діяльності людини. Рівень забруднення органічними речовинами та важкими металами поступово зростає і накопичується в донних відкладах, а магнітну сприйнятливості можна використовувати як швидкий, простий і неруйнівний інструмент для оцінки антропогенного впливу. Крім того, в роботі (Haltia-Hovi et al., 2010) магнітні властивості осадів вказують на серію змін у їх складі протягом голоцену, які добре корелюють з літологією осадів і вмістом органічного вуглецю. Магнітні властивості відрізняються за концентрацією дрібнозернистого магнетиту. Слід зауважити (Павлунь, Гайовський, & Шваєвський, 2024), що морфологія, морфометрія та фазовий склад мінералів руд Середнього Придніпров'я Українського щита дають підстави для виокремлення низки послідовно утворених мінеральних асоціацій стійкого складу, зокрема допродуктивний комплекс представлений пірит-кварцовою асоціацією (з магнетитом) і охоплює три парагенезиси: магнетит-кварцовий (435–390 °C), піротин-пірит-кварцовий із магнетитом (395–320 °C) і кварц-сидеритовий із перевідкладеним магнетитом (280–240 °C). Такі утворення можуть бути джерелом підвищеного магнітного сигналу донних відкладів озер заповідника "Хортиця". Наприклад, зерна магнетиту з озера Ізок (Нунавут, Канада) і озера Халфмайл (Нью-Брансвік, Канада), а також з прилеглих територій, було досліджено за допомогою скануючої електронної мікроскопії, мікросонда, мас-спектрометрії та оптичної мікроскопії (Makvandi et al., 2016). Результати свідчать про те, що Si, Ca, Zr, Al, Ga, Mn, Mg, Ti, Zn, Co, Ni та Cr належать до вмісних корінних порід. Титан є індикатором теллуричного і теригенного петрофону, пов'язаного з основними і кислими породами. Тоді як ансамбль кремнію, кальцію і магнію може бути пов'язаний із вивільненням кальцію і магнію при руйнуванні плагіоклазів і темнобарвних мінералів, що є діагенетичним процесом. Кремній – типовий рецикліт, тобто його вміст збільшується при руйнуванні корінних порід і формуванні уламкових порід, їх метаморфізації і повторенні відповідного циклу. Змінний склад метаморфічного магнетиту свідчить про те, що хімічний склад контролюється складом вмісних порід, ступенем метаморфізму та летючістю кисню.

Таким чином, наведені вище результати означають, що комбінація магнітного та геохімічного аналізів допомагають успішно диференціювати літогенні та антропогенні компоненти в озерних відкладах (Yunginger et al., 2018).

#### Методи

Загальний вигляд дослідженої території із врахуванням змін рівня води у Дніпрі біля острова Хортиця, а також пункти дослідження наведено на рис. 1. Представлено територію дослідження на космічних знімках супутника "LANDSAT5", загальний вигляд дослідженої території із розташуванням дослідних озер, острів Хортиця 10.2014 до підриву Каховського водосховища та острів Хортиця 07.2024 після підриву Каховського водосховища.

Загальний опис ґрунтового покриву, агрокліматичної зони, ландшафтів та досліджуваних озер наводиться в нашій роботі (Меньшов та ін., 2025). Хортиця розташовується в межах м. Запоріжжя та є найбільшим островом долини Дніпра. Ландшафтні умови характерні для степу України, у рельєфі панують долинно-балкові і заплавні форми. Основними ґрунотвірними породами, крім гранітів, служать лес і алювіальні піски, на яких формуються звичайні чорноземи, дернові, лугові і болотні ґрунти (Дубова, 2008). Автори досліджували донні відклади озер Кам'яне, Прогній, Рисове та Піщане (рис. 1).

*Характеристика Середньопридніпровського мегаблока Українського щита.* Результати наших попередніх досліджень (Меньшов та ін., 2025) схиляють до гіпотези, що визначальну роль у формуванні магнітних властивостей та елементного складу донних відкладів озер заповідника "Хортиця" відіграє дрібнодисперсний уламковий матеріал кристалічного фундаменту Українського щита. Тому детальніше розглянемо його характеристики. Хортиця зосереджена в межах Середньопридніпровського мегаблока Українського щита (Щербак, 1993). Серед ключових геоструктурних елементів фундаменту давніх платформ провідну роль відіграють архейські гранітно-зеленокам'яні області, які вирізняються характерними та чітко вираженими в глобальному масштабі геологічними ознаками. Вказані риси практично повністю проявляються в межах Середньопридніпровського мегаблока Українського щита. Даний мегаблок стабілізувався впродовж пізнього архею та в подальшій геологічній історії функціонував як відносно жорстке тектонічне утворення, зберігаючи структурну цілісність і впливаючи на формування регіональних геодинамічних процесів. У контексті петрологічної характеристики гранітоїдів Середньопридніпровської гранітно-зеленокам'яної області основними породотвірними компонентами мігматитових ареалів є гранітоїди. У загальному наближенні їх можна розподілити на дві великі групи: гранітоїди різноманітного петрографічного складу, переважно гнейсової будови, що тісно пов'язані з гнейсово-мігматитовою товщею та беруть участь у складчастих рухах; післяскладчасті (рідше пізньоскладчасті) масивні граніти, які формують структурно-речовинно відокремлені масиви та менш масштабні тіла. У межах Середньопридніпровської гранітно-зеленокам'яної області найбільше поширені гранітоїди першої групи, плагіоклазові, менше – мікроклін-плагіоклазові породи змінного складу. Їхній складчасто-гнейсовий вигляд однозначно вказує на їх синкінематичну природу. Тісний зв'язок цих гранітоїдів з мігматитами подібного складу, наявність у них численних, різного ступеня гранітизованих, непереміщених реліктів метаморфічних порід, а також інші ознаки свідчать про автохтонне походження більшості із цих утворень. Разом з тим досить звичними є гранітоїди, для яких більш імовірним є припущення про їх алохтонний характер. Геологічні та геохронологічні дані однозначно свідчать про складну та тривалу історію формування гранітоїдів цього типу, їх багаторазову участь у складчастих процесах, що супроводжувалися змінами мінерального складу й структурною перебудовою. Гранітоїди другої групи, виходячи з їхнього геологічного положення, формувалися в умовах поступової консолідації земної кори та проявів ранніх етапів розломної тектоніки. Вони мають чітко виражені активні контакти як з метаморфічними породами аульської та конксько-верхівцевської серій, так і з гранітоїдами першої групи.





а



б



в

**Рис. 1. Територія дослідження на космічних знімках супутника "LANDSAT5" острова Хортиця:**  
а – загальний вигляд дослідженої території з розташуванням дослідних озер; б – острів Хортиця 10.2014 до підриву Каховського водосховища; в – острів Хортиця 07.2024 після підриву Каховського водосховища

В комплексі об'єднуються кілька породних асоціацій, склад яких змінюється від тоналітів, плагіогранітів до лейкоплагіогранітів (Толстой та ін., 2003). Характерною особливістю гранітоїдів комплексу є успадкованість ними особливостей речовинного складу субстрату, за рахунок якого вони власне сформувалися. В них також постійно трапляються скіаліти вмісних порід, серед яких визначаються біотитові, амфіболітові гнейси, зрідка амфіболіти. Плагіогранітоїди відстежуються у вигляді незначних за розміром лінзоподібних тіл переважно в межах геантиклінальних підняттяв і поширені практично на всій території мегаблока. Спостерігається прояв процесів мікроклінізації.

Більш детально розглянемо плагіограніти запорізькі, які трапляються саме у східній частині Запорізько-Томківського куполоподібного підняття: м. Запоріжжя, район Верхня Хортиця, 500 м на південний захід від залізничної колії, кар'єр. Плагіограніти запорізькі характеризуються відносно однорідною будовою і відсутністю реліктів метаморфічних порід. На окремих ділянках плагіограніти інтенсивно калішпатизовані й насичені

малопотужними жилами апліто-пегматоїдних гранітів. Визначаються зонки дроблення й катаклазу, що пояснюється безпосередньою близькістю плагіогранітів до зони Хортицького розлому. Структура гіпідіоморфнозерниста, бластогранітова. Мінеральний склад: плагіоклаз (49–66 %), кварц (27–36 %), калієвий польовий шпат (1–8 %), біотит (1–5 %). Акцесорні мінерали (0,5 %): апатит, сфен, циркон. Вторинні мінерали (2,5 %): серицит, епідот, дрібна луска мусковіту, карбонат, хлорит по біотиту. У запорізьких плагіогранітах плагіоклаз утворює зерна табличчастої форми розміром 0,2–1,6 мм, зрідка трапляються вкрапленики до 4,0 мм. Плагіоклаз інтенсивно заміщується серицитом, з країв зерен розвиваються альбітові облямівки розкиснення. Калішпат присутній у невеликій кількості, нерівномірно розвивається на окремих ділянках і представлений ксеноморфними зернами мікрокліну з розпливчастою, ґратчастою структурою й полум'яними пертитами. Калішпат пізніший, має реакційні взаємовідносини з плагіоклазом, замінюючи його. Біотит розвивається у міжзерновому просторі у вигляді одиничних лусочок і скупчень. Колір бурий, бурувато-



зелений. Біотит заміщується дрібною лускою мусковіту (Толстой та ін., 2003).

Лабораторні вимірювання магнітної сприйнятливості проводилися за допомогою капамістка KLY-2, потім розраховувалася питома магнітна сприйнятливість  $\chi$  ( $10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг) шляхом нормалізації до маси. Вміст елементів було досліджено шляхом XRF аналізу за допомогою інструменту ElvaX Pro, що являє собою лабораторний рентгенофлуоресцентний аналізатор для широкого діапазону елементів від Na (11) до U (92) завдяки використанню нової потужної рентгенівської трубки з напругою анода до 60 кВ, струмом до 1000 мкА та SDD детектора надвеликої площі 40 мм.

### Результати

Аналіз та інтерпретація результатів дослідження магнітної сприйнятливості та елементного складу донних відкладів і ґрунтів усієї колекції острова Хортиця із врахуванням результатів опублікованих у статті (Меньшов та ін., 2025) продемонструвало необхідність розбиття колекції на різні групи (кластери), оскільки хімічний, літологічний склад, а також вміст та походження магнітних мінералів, скоріше за все, має різний, не пов'язаний на пряму один з одним генезис. Зразки ґрунту, відібрані в лісовій місцевості, зазнали впливу пожежі, яка була індукована антропогенним чинником (можливо уламки

збитого дрону або ракети). Крім того, у цих ґрунтах більшою мірою превалює педогенний характер магнетизму, тобто нормальний для ґрунтового покриву розвиток генетичних горизонтів із врахуванням ландшафтно-кліматичних умов острова. Їх магнітна сприйнятливість є високою ( $\chi=97\text{--}572\times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг). Перевищення ГДК для свинцю не зафіксовано. У той же час відзначається підвищення ГДК для цинку у 2–5 разів, хрому в 20–30 разів, міді у 1,1–3 рази, нікелю в 4–10 разів, кобальту у 3–4 рази. Такі характеристики ми пов'язуємо із процесами горіння, а також можливим антропогенним впливом від промислового забруднення Запоріжжя (Bondar et al., 2024).

Іншою є картина магніто-геохімічної моделі донних відкладів озер. На рис. 2 наведено гістограму розподілу значень магнітної сприйнятливості донних відкладів озер заповідника "Хортиця". Розподіл близький до нормального. Найімовірніші значення лежать у діапазоні  $\chi=80\text{--}150\times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг. Сюди потрапляють зразки озер Прогній, Кам'яне та Піщане. Ліва асиметрія розподілу із значеннями  $\chi=17\text{--}80\times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг складена переважно зразками осади з озера Рисове. Ліва асиметрія розподілу з високими значеннями  $\chi=200\text{--}300\times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг також складена переважно зразками Рисового, тобто маємо дві підвибірки зразків для даного озера.

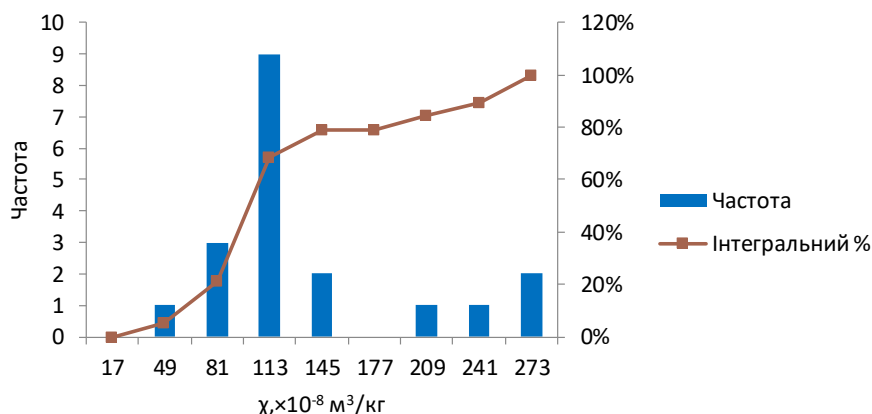


Рис. 2. Гістограма розподілу значень магнітної сприйнятливості донних відкладів озер заповідника "Хортиця"

На рис. 3 наводяться гістограми розподілу вмісту важких металів у зразках донних відкладів озер заповідника "Хортиця", для яких є значущим коефіцієнт кореляції із магнітною сприйнятливістю. Такими елементами визначено Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Hg, Pb, Cr. Розподіл близький до нормального для Fe, Co, Hg. У той же час розподіл подібний до логнормального для Ni, Cu, Zn, Pb, Cr. ГДК для Fe сягає 19974 мкг/кг, що застосовується для ґрунтів степу України). Тобто уся вибірка демонструє перевищення ГДК у 1,5–7 разів. Для рухомої форми Co ГДК приймається як 5 мкг/кг відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325 "Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин". Отже, перевищення сягає 5–18 разів. Для Ni перевищення ГДК становило 6–60 разів, для Cu – 7–30 разів, для Zn – 2–30 разів (найбільш імовірні значення вибірки перевищують у 5–10 разів). Частина зразків не фіксує перевищення для Hg, а для решти ГДК перевищується у 2–4 рази. Крім того, Pb перевищує у 2–5 разів, а Cr – у 15–70 разів (одне із найвищих перевищень ГДК).

На рис. 4 представлено графіки залежностей між магнітною сприйнятливістю та вмістом важких металів у

зразках донних відкладів озер острова Хортиця. Коефіцієнт кореляції є значущим для досліджуваної вибірки, якщо він перевищує 0,35 з імовірністю похибки 0,05. Таким чином, отримано коефіцієнти кореляції  $\chi$ : Fe=0,52, Co=0,61, Ni=0,58, Cu=0,52, Zn=0,79, Hg=0,50, Pb=0,40, Cr=0,38.

Слід зауважити, що високі зв'язки з магнітною сприйнятливістю отримано і для деяких інших елементів: Si=-0,55, S=0,49, Sr=0,35. Однак дані залежності слід аналізувати за іншим алгоритмом.

### Дискусія та висновки

Результати наших попередніх досліджень магнітних властивостей донних відкладів озер та ґрунтового покриву заповідника "Хортиця" (Меньшов та ін., 2025) дали змогу зробити припущення про три основні форми формування магнітного сигналу у відповідних природних об'єктах, а також накопичення важких металів та інших хімічних елементів. Перший пов'язаний із природними факторами розвитку ґрунтового покриву та накопичення матеріалу у донних осадах. Другий має у своїй основі факт техногенного забруднення за рахунок привнесення речовин із розташованої поруч промислової агломерації міста Запоріжжя. Зокрема, за результатами (Bondar

et al., 2024) металургійні підприємства Запоріжжя, інтегровані в житлове середовище міста, спричиняють значне збагачення верхнього шару ґрунту шкідливими речовинами, включаючи дрібні тверді частинки, що містять важкі метали та магнітні оксиди заліза. Було виявлено два типи магнітних промислових викидів, які сприяють намагніченню міського ґрунту: поширення грубозернистих частинок, що містять магнетит, обмежене промисловою зоною, тоді як менші магнітні сфери осідають далеко від джерел забруднення, приносячи значну кількість важких металів у ґрунт. Можна припустити, що

дані ультрадисперсні частинки могли накопичуватися і в межах острова Хортиця. Дослідження магнітних властивостей ґрунтів з метою виявлення кореляції із показниками забруднення в Україні вказують на підвищені концентрації Cu, Ni, Zn та фіксують позитивну кореляцію з магнітною сприйнятливістю (Bondar, & Tsiupa, 2024). Високі значення магнітної сприйнятливості порівняно з фоновими фіксуються у зразках ґрунту, відібраних поблизу доріг з інтенсивним рухом та в зонах впливу інших техногенних процесів (Menshov et al., 2023).

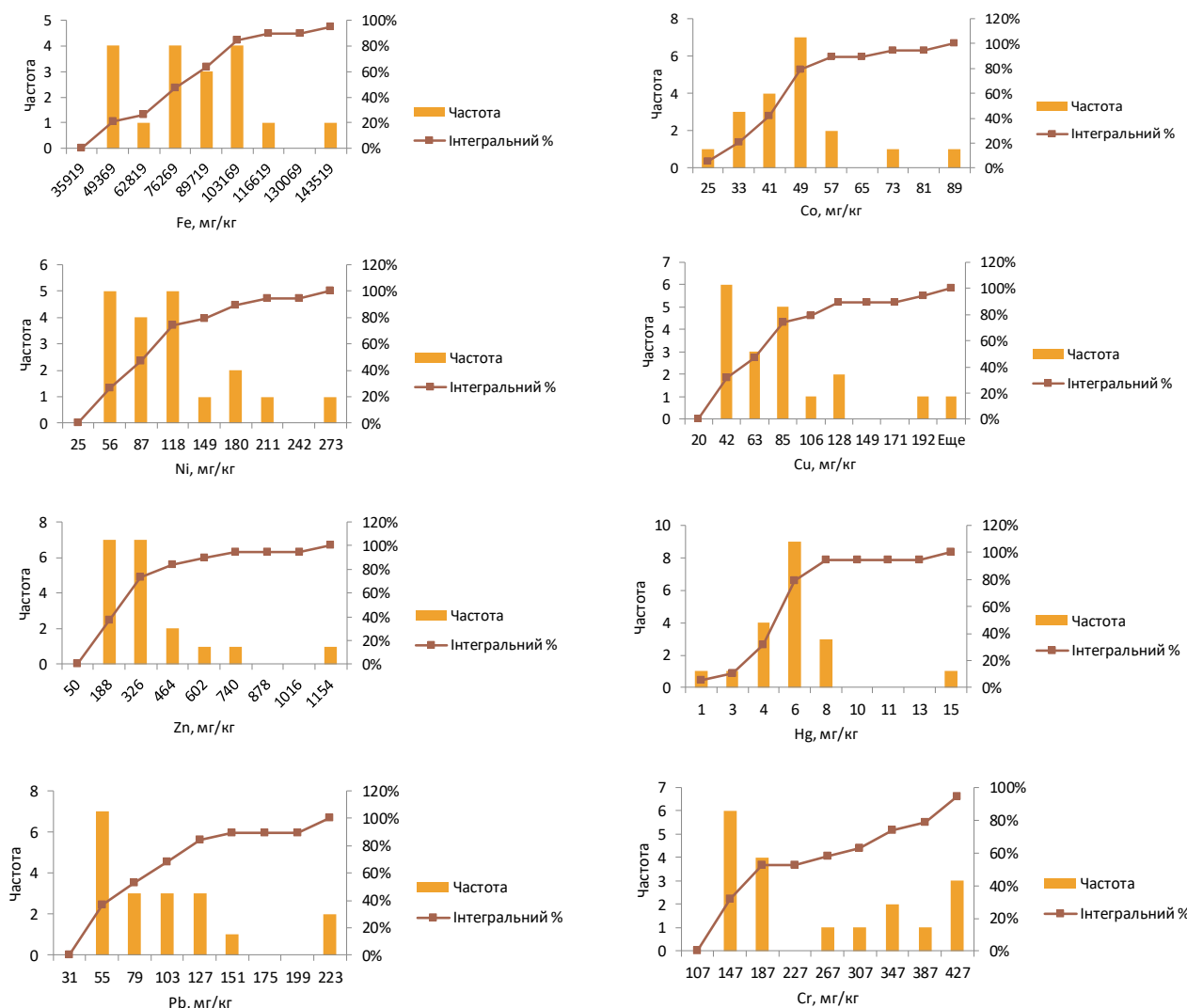


Рис. 3. Гістограма розподілу вмісту важких металів у зразках донних відкладів озер заповідника "Хортиця", для яких є значущим коефіцієнт кореляції з магнітною сприйнятливістю

У той же час поведінка магнітної сприйнятливості, взаємозв'язки із вмістом важких металів донних відкладів у межах озер о. Хортиця демонструють дещо інші закономірності. Тому очевидним стає висновок про третій генезис формування підвищеного магнітного сигналу. Він пов'язаний із предомінуванням привнесеної речовини літогенного генезису від розташованих навкруги кристалічних порід Українського щита. Зокрема, мова може йти про силікат-магнетитові і магнетит-силікатні джеспіліти, силікат-магнетит-гематити, гематит-магнетитові джеспіліти продуктивної товщі, кумінгтонітові шари з магнетитом, альбітом, магнезіальною залізистою

слюдою, егірин-магнетитові та гематит-магнетитові джеспіри, рудні магнетито-кварцові, залізнослюдово-магнетитові шари, хлорит-карбонат-магнетит-кварцові роговики, кварц-хлоритові, карбонат-кварц-магнетит-хлоритові сланці і т. ін. (Usenko, 2018). Отже, граніто-гнейси, метабазити, сланці та залізисті породи і деякі інші геологічні формації Українського щита демонструють підвищений вміст оксиду титану ( $TiO_2$ ) та оксиду заліза ( $Fe_2O_3$ ) за одночасно зниженого вмісту діоксиду кремнію ( $SiO_2$ ). Магнітна сприйнятливість таких утворень може сягати  $5000 \times 10^{-5}$  одиниць CI (Єнтін та ін., 2023).

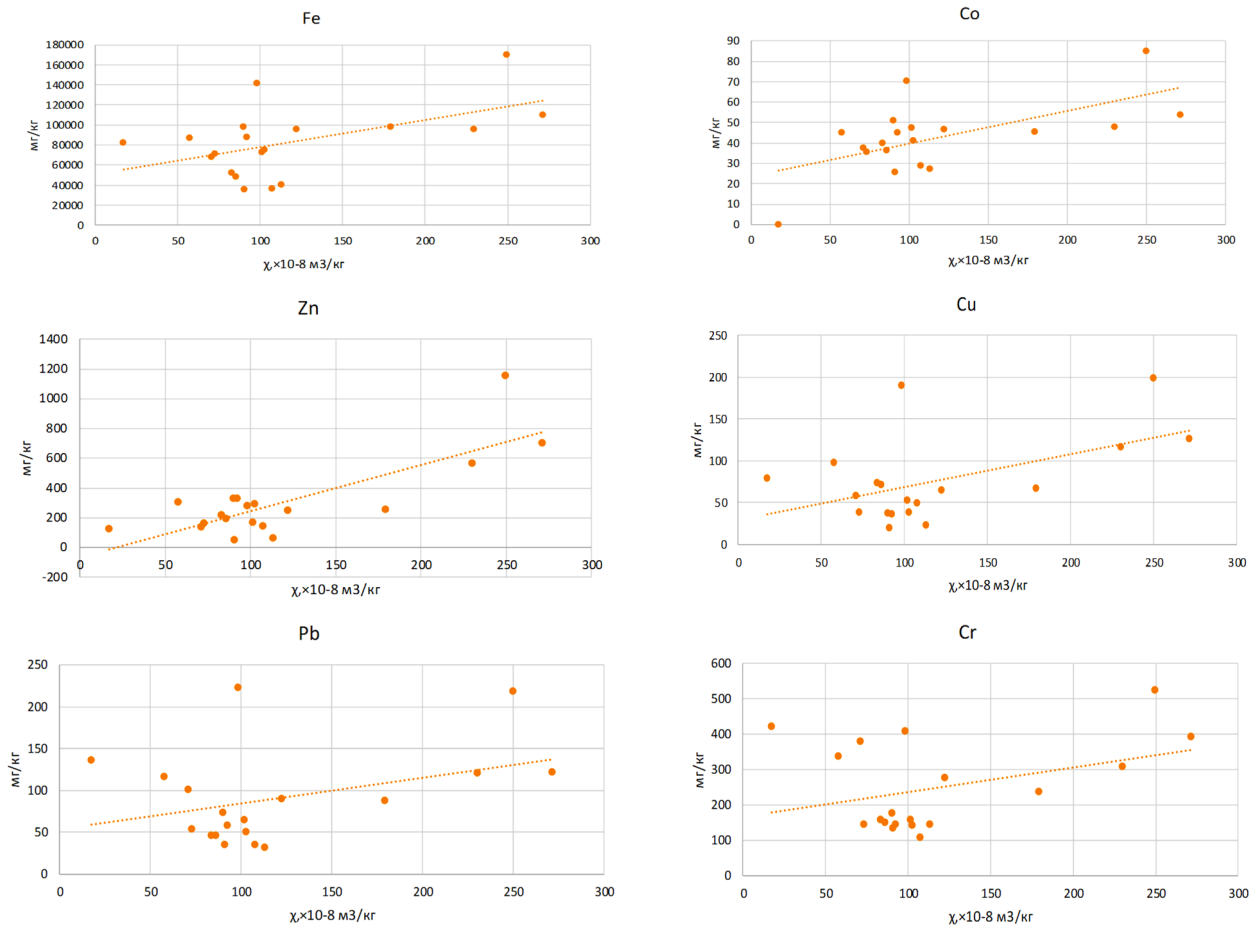


Рис. 4. Графіки залежностей між магнітною сприйнятливістю та вмістом важких металів у зразках донних відкладів озер заповідника "Хортиця", для яких є значущим коефіцієнт кореляції

Магнітна сприйнятливість є чутливим, швидким і точним методом для виявлення процесів і особливостей ґрунтоутворення. Зокрема, в роботі (Cervi et al., 2019) показано, як аналіз головних компонентів і кластерний аналіз групують ґрунти відповідно до належності до різних природних і антропогенних ландшафтів. Зокрема, виділено розташування вододілів, схилів, ділянки низин, пісковиків, дна долин. Ці матеріали вказують на те, що магнітна сприйнятливість є ефективним показником властивостей ґрунту для групування та ідентифікації педогенних і геохімічних сегментів (типізація) у межах ландшафту. Крім того, в роботі (Barrios et al., 2012) продемонстровано аналіз головних компонент і отримано висновки, що  $\chi$  є важливою властивістю, яку можна використовувати для ідентифікації сегментів ландшафту, оскільки кореляція цієї властивості в межах першої головної компоненти була високою. Сегменти ландшафту диференційовано за допомогою аналізу головних компонент та кластерного аналізу, використовуючи лише властивості з вищою дискримінаційною здатністю. Кластерний аналіз магнітної сприйнятливості повітряно-сухої дрібноземної речовини (MS ADFE), магнітної сприйнятливості загальної піщаної фракції (MS TS) та магнітної сприйнятливості глинистої фракції (MS CI) дав змогу сформувати три групи, які узгоджуються з поділом сегментів, установленим у польових умовах. Групування за допомогою кластерного аналізу показало, що  $\chi$  є інструментом, який може полегшити ідентифікацію сегментів ландшафту та дозволити картографування більш однорідних областей у подібних місцях. Зауважимо, що

для типізації ландшафтних умов з різними моделями мілливості за допомогою статистичного протоколу з даними магнітної сприйнятливості можна використовувати й інші атрибути ґрунту. Наприклад, колір ґрунту, який є коваріантним атрибутом факторів та процесів ґрунтоутворення (Siqueira et al., 2015). У нашому випадку дослідження на основі кластерного аналізу є наступним кроком. На даному етапі ми виокремили лісовий ландшафт Хортиці, ґрунти якого зазнали впливу пожежі, яка превалює над потенційним накопиченням важких металів від викидів промисловості Запоріжжя. Також було виділено ландшафт осушеного дна озер, донні відклади якого характеризуються підвищенням магнітної сприйнятливості, що скоріше за все пов'язується із привнесенням літогенного матеріалу від гірських порід Українського щита. На нашу думку, в усіх дослідних об'єктах Хортиці наявний техногенний пил та важкі метали антропогенного походження. Важливим кроком є розробка ефектної технології розбавки техногенного сигналу та високомагнітного сигналу від процесів горіння та привнесеного літогенного матеріалу.

Отже, донні відклади озер острова Хортиця є надзвичайно цінним природним об'єктом для ретроспективного вивчення накопичення магнітної речовини, важких металів, уламкових гірських порід різного генезису з метою визначення природного та техногенного впливу на екосистеми заповідника протягом кількох століть.

**Внесок авторів:** Олександр Меньшов – концептуалізація, ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Лідія Горюшкова – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті;



Станіслав Горошков – вимірювання та обробка даних; Тургай Діндароглу – валідація та аналіз даних.

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

#### Список використаних джерел

- Дубова, О.В. (2008). Еколого-агрохімічна оцінка та фізичні властивості ґрунтів заплавної зони острова Хортиця. *Вісник ЗНУ. Біологія*, 2, 53–59.
- Снтіні, В. А., Гінтов, О. Б., Орлюк, М. І., & Марченко, А. В. (2023). Локальні магнітні аномалії Українського щита як індикатори прояву різновікових етапів осередково-каналного магматизму. *Геофизический журнал*, 45(2), 44–62.
- Меньшов, О., Горошкова, Л., Голуб, О., & Горошков, С. (2025). Магнітні дослідження донних відкладів та ґрунтів як інструмент виявлення небезпечних геодинамічних екзогенних процесів на прикладі заповідника Хортиця. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(108), 15–21. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02>
- Павлунь, М., Гайовський, О., & Шваєвський, Т. (2024). Термобарогеохімія процесів рудоутворення на золоторудному родовищі балка Широка (Український щит). *Мінералогічний збірник*, 74, 45–55.
- Толстой М.І., Гасанов Ю.Л., & Костенко Н.В. (2003). *Петрогеохімія і петрофізика гранітоїдів Українського щита та деякі аспекти їх практичного використання*. ВПЦ "Київський університет".
- Усенко, О. (2018). Розвиток українського щита 2,7–2,3 млрд років тому. Факти та попередні висновки. *Доповіді Національної академії наук України*, 12, 61–70. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.12.061>
- Щербак, Н.П. (1993). *Гранитоїди Українського щита. Петрохімія, геохімія, рудоносність*. Наукова думка.
- Barrios, M. D. R., Marques Junior, J., Panosso, A. R., Siqueira, D. S., & La Scala Junior, N. (2012). Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36, 1073–1082.
- Blumentritt, D. J., & Lascau, I. (2015). *A comparison of magnetic susceptibility measurement techniques and ferrimagnetic component analysis from recent sediments in Lake Pepin (USA)*.
- Bondar, K. M., Tsiupa, I. V., Sachko, A. V., & Nasiedkin, I. I. (2024). Pre-war situation with soil pollution in the city of Zaporizhzhia: Metallurgical industry center in Ukraine—Characterized by magnetic, geochemical and microscopy methods. *Acta Geophysica*, 72(2), 1355–1375.
- Bondar, K. M., & Tsiupa, I. V. (2024). Long-and short-term pollution effect in megapolis assessed from magnetic and geochemical measurements on soils, tree trunk bark, and air filters. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1041.
- Cervi, E. C., Maher, B., Polisei, P. C., de Souza Junior, I. G., & da Costa, A. C. S. (2019). Magnetic susceptibility as a pedogenic proxy for grouping of geochemical transects in landscapes. *Journal of Applied Geophysics*, 169, 109–117.
- Dubova, O. V. (2008). Ecological-agrochemical assessment and physical properties of soils in the floodplain zone of Khortytsia Island. *Bulletin of ZNU. Biology*, 2, 53–59 [in Ukrainian].
- Guo, W., Huo, S., & Ding, W. (2015). Historical record of human impact in a lake of northern China: Magnetic susceptibility, nutrients, heavy metals and OCPs. *Ecological Indicators*, 57, 74–81.
- Haltia-Hovi, E., Nowaczyk, N., Saarinen, T., & Plessen, B. (2010). Magnetic properties and environmental changes recorded in Lake Lehmilampi (Finland) during the Holocene. *Journal of Paleolimnology*, 43, 1–13.
- Makvandi, S., Ghasemzadeh-Barvarz, M., Beaudoin, G., Grunsky, E. C., McClenaghan, M. B., & Duchesne, C. (2016). Principal component analysis of magnetite composition from volcanogenic massive sulfide deposits: Case studies from the Izok Lake (Nunavut, Canada) and Halfmile Lake (New Brunswick, Canada) deposits. *Ore Geology Reviews*, 72, 60–85.
- Menshov, O. I., & Sukhorada, A. V. (2012). Soil magnetism in Ukraine. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 1.
- Menshov, O., Horoshkova, L., Golub, A., & Horoshkov, S. (2025). Magnetic studies of sediments and soils as a tool for detection of dangerous geodynamic exogenic processes on the example of the Khortysya reserve. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(108), 15–21 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.108.02>
- Menshov, O., Vyzhva, S., Horoshkova, L., Tonkha, O., Ivanik, O., Pereira, P., ... & Eiben, H. (2023). Distribution of soil magnetic susceptibility as a pollution indicator in the urban and tourist city of Lviv, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 82(21), 486.
- Pavlyun, M., Gaiovsky, O., & Shvaevsky, T. (2024). Thermobarogeochemistry of ore-formation processes at the balka Shyroka gold-ore deposit (Ukrainian shield). *Mineralogical Collection*, 74, 45–55 [in Ukrainian].
- Shcherbak N.P. (1993). *Granitoids of the Ukrainian Shield. Petrochemistry, geochemistry, ore potential*. Naukova Dumka [in Russian].
- Siqueira, D. S., Marques Jr, J., Pereira, G. T., Teixeira, D. B., Vasconcelos, V., Júnior, O. C., & Martins, E. D. S. (2015). Detailed mapping unit design based on soil–landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. *Catena*, 135, 149–162.
- Tolstoy M.I., Hasanov Yu.L., Kostenko N.V. (2003). *Petrogeochemistry and petrophysics of granitoids of the Ukrainian Shield and some aspects of their practical use*. PPC "Kyiv University" [in Ukrainian].
- Usenko, O. (2024). The development of the Ukrainian Shield was 2.7–2.3 billion years ago. Facts and preliminary conclusions. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 61–70 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.12.061>
- Yentini, V. A., Gintov, O. B., Orlyuk, M. I., & Marchenko, A. V. (2023). Local magnetic anomalies of the Ukrainian Shield as indicators of the manifestation of different-age stages of focal-channel magmatism. *Geophysical Journal*, 45(2), 44–62 [in Ukrainian].
- Yunginger, R., Bijaksana, S., Dahrin, D., Zulaikah, S., Hafidz, A., Kirana, K. H., ... & Fajar, S. J. (2018). Lithogenic and anthropogenic components in surface sediments from Lake Limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals, and REE geochemistry. *Geosciences*, 8(4), 116.

Отримано редакцію журналу / Received: 04.01.25

Прорецензовано / Revised: 03.03.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

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

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

Stanislav HOROSHKOV<sup>1</sup>, Student  
ORCID ID: 0009-0009-4310-9165  
e-mail: stas20055008@gmail.com

Turgay DINDAROGLU<sup>3</sup>, DSc, Prof.  
ORCID ID: 0000-0003-2165-8138  
e-mail: turgay.dindaroglu@ktu.edu.tr

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National University of Kyiv Mohyla Academy, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Karadeniz Technical University, Faculty of Forestry, Trabzon, Türkiye

## COMPREHENSIVE MODEL OF HEAVY METALS CONTENT AND MAGNETIC PROPERTIES OF SOIL AND SEDIMENTS OF LAKES OF KHORTYSYA RESERVE

**Background.** *Natural and anthropogenically modified complexes of the nature reserve fund of Khortytysya Island are subject to significant pressure from human activity, technogenic processes, and military factors. It is also important to take into account the transformations caused by the regulation of the Dnipro River's flow, the operation of the DniproHES hydroelectric station, and the consequences of the destruction of the Kakhovka Reservoir. All these factors have led to substantial changes in the water regime and landscape structure of the area. The main objective of the proposed study is to investigate changes in natural and anthropogenic landscapes of the Khortytysya reserve through the analysis of magnetic properties and the content of toxic chemical elements (in particular, heavy metals) in the bottom sediments of desiccated lakes formed as a result of the destruction of the Kakhovka Dam, as well as in the soil.*

**Methods.** *Laboratory measurements of magnetic susceptibility were conducted using a KLY-2 kappabridge. The mass-specific magnetic susceptibility  $\chi$  ( $10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ) was then calculated by normalizing the obtained values to the sample mass. The elemental composition was determined using X-ray fluorescence (XRF) analysis with the ElvaX Pro instrument, a laboratory XRF analyzer capable of detecting elements in the range from Na (11) to U (92).*

**Results.** *The magnetic susceptibility values in the analyzed soil samples are extremely high ( $\chi=97\text{--}572 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$ ). Significant exceedances of maximum permissible concentrations were recorded for zinc (2–5 times higher), chromium (20–30 times), copper (1.1–3 times), nickel (4–10 times), and cobalt (3–4 times). These elevated values are likely associated with combustion processes, as well as anthropogenic impact, particularly industrial pollution originating from Zaporizhzhia. At the same time, the behavior of magnetic susceptibility and its correlation with heavy metal content in the bottom sediments of Khortytysya lakes demonstrates different patterns. This suggests the existence of an additional mechanism contributing to the elevated magnetic signal, related to the predominance of lithogenic material likely derived from surrounding crystalline rocks of the Ukrainian Shield.*

**Conclusions.** *The bottom sediments of Khortytysya lakes represent an extremely valuable natural archive for retrospective analysis of magnetic particle formation, accumulation of heavy metals, and clastic rocks of various origins, aimed at assessing both natural and anthropogenic influences on the ecosystems of the Khortytysya reserve over the past several centuries.*

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

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

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

УДК 550.34

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.08>

Дмитро МАЛИЦЬКИЙ<sup>1</sup>, д-р. фіз.-мат. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0002-9156-739x  
e-mail: dmalytskyy@gmail.com

Олександра АСТАШКІНА<sup>1</sup>, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.  
ORCID ID: 0009-0004-2065-4236  
e-mail: sac1@ukr.net

Руслан ПАК<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, наук. співроб.  
ORCID ID: 0000-0001-8781-4688

Андрій ГНИП<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.  
ORCID ID: 0000-0002-2612-4234  
e-mail: agnyp.gm@gmail.com

Маркіян ДОБУШОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, канд. фіз.-мат. наук, мол. наук. співроб.  
ORCID ID: 0009-0004-4358-2298  
e-mail: mdobush13@gmail.com

<sup>1</sup>Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОГНИЩА ЗЕМЛЕТРУСУ ЗА ДАНИМИ ОБМЕЖЕНОЇ КІЛЬКОСТІ СЕЙСМІЧНИХ СТАНЦІЙ

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

**Вступ.** Представлено метод визначення тензора сейсмічного моменту з використанням лише прямих *P*- і *S*-хвиль, менш чутливих до модельних ефектів поширення, ніж відбиті та заломлені хвилі, що значно підвищує точність і надійність методу. Вогнище землетрусу розглядається як точкове, із заздалегідь відомим розташуванням і часом початку події.

**Методи.** Поширення хвиль у середовищі, яке моделюється набором горизонтально-однорідних пружних шарів, обчислюється за допомогою матричного методу, що дає змогу виділяти лише прямі хвилі. На основі прямої задачі із використанням розв'язку узагальненого обернення показано алгоритм обернення спостережених хвильових форм з метою визначення компонент сейсмічного тензора  $M(t)$ . Аналіз здійснено на основі записів землетрусу, що стався 22 лютого 2024 року у Східній Словаччині, використовуючи дані лише двох сейсмічних станцій Словацької мережі: sk19 (49.25°N, 21.93°E) та sk20 (49.21°N, 21.61°E).

**Результати.** Для перевірки достовірності отриманих параметрів вогнища землетрусу здійснено порівняльний аналіз синтетичних сейсмограм, розрахованих на основі методики математичного моделювання хвильового поля матричним методом і спостережуваних записів для прямих *P*- і *S*-хвиль на станції sk19. Проведено кореляційний аналіз прямих *P*- і *S*-хвиль для спостережуваних і синтетичних сейсмограм. Результати аналізу показали високу достовірність визначеного тензора сейсмічного моменту для землетрусу 2024-02-22 (Східна Словаччина), отриманого шляхом обернення лише прямих хвиль.

**Висновки.** Використання точкового джерела у вигляді сейсмічного тензора, розміщеного всередині горизонтально-шаруватого півпростору, є ефективним для визначення фокальних механізмів землетрусів. Результати дослідження підтверджують доцільність використання лише прямих *P*- і *S*-хвиль для визначення тензора сейсмічного моменту, що сприяє підвищенню точності обчислень та зменшенню впливу модельних ефектів поширення.

**Ключові слова:** тензор сейсмічного моменту, фокальний механізм, матричний метод, синтетичні сейсмограми, кореляційний аналіз.

### Вступ

Визначення параметрів вогнищ землетрусів є важливою сейсмологічною задачею. Такі задачі зазвичай вирішують шляхом розв'язання оберненої задачі (Малицький, 2016; Dreger, & Helmberger, 1993; Asano et al., 2024; Hallo, & Gallovič, 2016; Minson, 2024; Stiernström, 2024; Kubo et al., 2020; Chen et al., 2019), а також на підставі записів на сейсмічних станціях із використанням полярностей вступу прямих *P*-хвиль (Dziewonski et al., 1981). Останній метод є найбільш використаний для великої кількості станцій. На сьогодні відразу після сейсмічної події розроблено методи дають змогу в автоматичному режимі визначати фокальний механізм. У такому випадку є можливість використання фокальних механізмів для вирішення інших важливих задач, зокрема для визначення тензора напружень за фокальними механізмами (Vavrušuk, & Kuhn, 2012). Але у випадку сейсмічних регіонів з малою сейсмічністю, коли лише кілька станцій зареєстрували сейсмічну подію, визначення параметрів вогнища за полярностями прямих *P*-хвиль є неможливим. Потрібні нові підходи і методи для таких задач. Автори даної статті застосували розроблений у роботах (Малицький, 2016; Malytsky, & Asano, 2024) метод визначення сейсмічного тензора і фокального механізму, використовуючи прямі *P*- і *S*-хвилі на обмеженій кількості станцій. У

представленій роботі автори визначають тензор сейсмічного моменту для події, яка відбулася 22 лютого 2024 р. ( $t_0=12:54:15$  UTC, 21.75°E, 49.03°N, Depth 9 km, ML3.0, Східна Словаччина). Даний землетрус записаний кількома сейсмічними станціями Словацької мережі. Автори використали записи тільки на двох станціях, а саме sk19 і sk20 (рис. 1). Відзначимо, що такі сейсмологічні задачі щодо визначення параметрів вогнищ землетрусів є важливими як для Східної Словаччини (Schlomer et al. 2024), так і для сейсмоактивних регіонів України.

### Методи

У роботах (Малицький, 2016, Malytsky, & Asano, 2024) показано методику визначення сейсмічного тензора і фокального механізму для прямих хвиль з використанням записів на обмеженій кількості станцій. Зауважимо, що дану методику розроблено для поширення сейсмічних хвиль від точкового джерела, представленого сейсмічним тензором. Сейсмічні хвилі поширюються в шаруватому півпросторі (Малицький, 2016). Метод базується на матричному методі Томпсона і Хаскела (Thomson, 1950), який достатньо добре розвинутий у роботі (Aki, & Richards, 2002).

Схема обернення складається з двох кроків: пряме й обернене моделювання. Спочатку розглядаємо поширення сейсмічних хвиль у вертикально неоднорідних середовищах і з використанням розробленого варіанта

© Малицький Дмитро, Асташкіна Олександра, Пак Руслан, Гнип Андрій, Добушовський Маркіян, 2025



матричного методу обчислюємо синтетичні сейсмограми на вільній поверхні горизонтально-шаруватого ізотропного середовища. Точкове вогнище розташоване всередині однорідного шару. Переміщення на поверхні представляємо у матричній формі, окремо для далекого і близького поля. Далі розглядаємо переміщення лише в далекому полі, а хвильове поле для прямих Р- та S-хвиль отримуємо з використанням задачі на власні вектори і власні значення (Малицький, 2016). Обернена задача полягає в обчисленні спектрів компонент тензора сейсмічного моменту, які отримуємо з використанням так званого розв'язку узагальненого обернення і перетворенні їх у часову ділянку з використанням оберненого перетворення Фур'є.

Отже, компоненти тензора сейсмічного моменту, отримані з використанням узагальненого обернення (Малицький, 2016), мають вигляд

$$M(\tilde{G}^*G)^{-1}\tilde{G}^*U,$$

(1)

де  $U^{(0)}=(U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_y^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S})$  – компоненти переміщень прямих Р- і S- хвиль; сейсмічний тензор  $M=(M_{xz}, M_{yz}, M_{zz}, M_{xx}, M_{yy}, M_{xy})^T$  містить шість незалежних компонент;  $G$  – матриця, яка визначається швидкісною моделлю (Малицький, 2016); матриця  $\tilde{G}^*$  є комплексно-спряжена і транспонована до матриці  $G$ .

Відрізки записів, що відповідають лише прямим Р- і S-хвилям, визначаємо візуально, з урахуванням затримок фаз за відповідної епіцентральної відстані та глибини вогнища. Максимальна частота у спектрах записів контролюється припущенням про точкове вогнище та відповідає довжині хвилі, що перевищує лінійні розміри розриву у ньому.

Результати

Ефективність запропонованого методу протестовано на землетрусу у Східній Словаччині. Для цієї мети вибрано сейсмічну подію, яка відбулася 22 лютого 2024 р. (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). Використано сейсмічні записи лише на двох станціях: sk19 (49.25°N, 21.93°E) і sk20 (49.21°N, 21.61°E) Словацької мережі (рис. 1).

Швидкісну модель представлено в табл. 1 (Malek et al., 2023). Джерело сейсмічних хвиль – на глибині 9 км. Відзначимо, що сейсмічні станції sk19 і sk20 розташовані в різних квадрантах навколо епіцентру землетрусу (рис. 1).

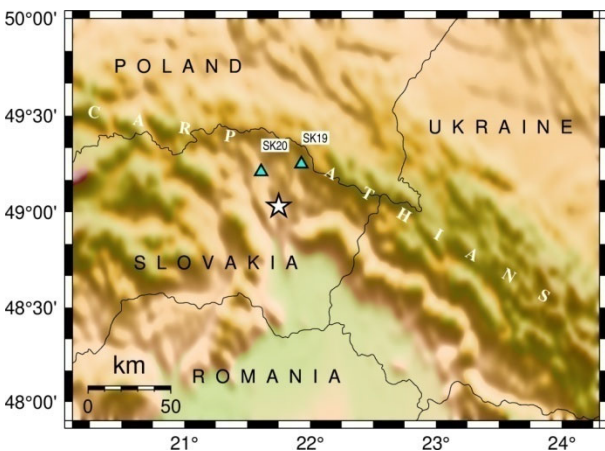


Рис. 1. Розміщення станцій sk19 (49.25°N, 21.93°E) і sk20 (49.21°N, 21.61°E) (трикутники) словацької мережі. Епіцентр землетрусу 2 лютого 2024 року показано зіркою (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0) (Malytskyy et al., 2025)

Таблиця 1

| 1D швидкісна модель |                    |                    |                       |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|
| $h_s(\text{km})$    | $V_P(\text{km/s})$ | $V_S(\text{km/s})$ | $\rho(\text{g/cm}^3)$ |
| 1,0                 | 2,5                | 1,445              | 2,2                   |
| 3,0                 | 3,7                | 2,139              | 2,44                  |
| 3,0                 | 5,2                | 3,006              | 2,74                  |
| 10                  | 5,9                | 3,41               | 2,88                  |
| 3                   | 6,4                | 3,699              | 2,98                  |
| 4                   | 6,75               | 3,902              | 3,05                  |
|                     | 8,0                | 4,624              | 3,3                   |

Компоненти тензора сейсмічного моменту, які обчислено за формулою (1), використовуючи обернення хвильових форм для прямих хвиль на станціях sk19 and sk20 та фокальний механізм, представлено на рис. 2.

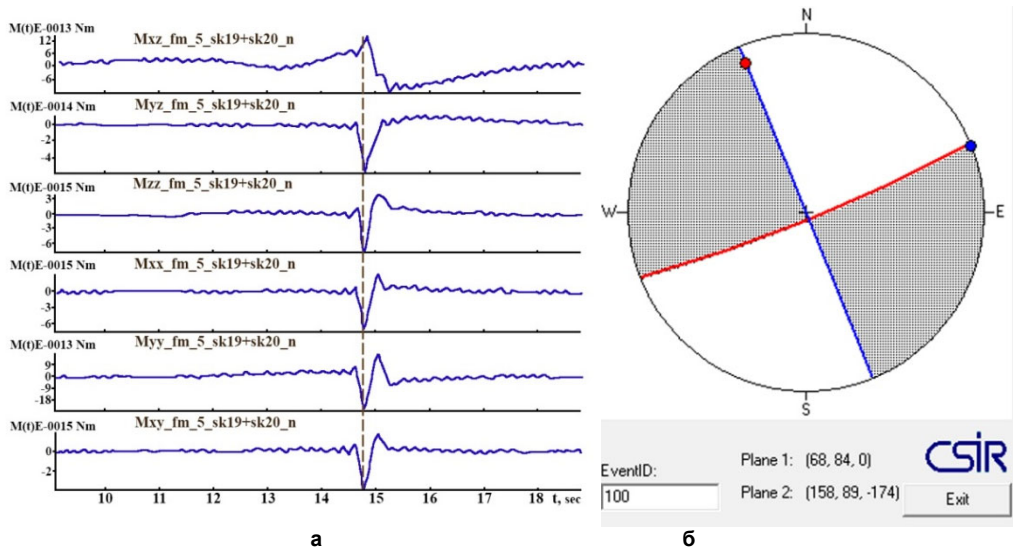


Рис. 2. Компоненти тензора сейсмічного моменту для землетрусу 2024-02-22 (Східна Словаччина), які отримано шляхом обернення тільки прямих хвиль, записаних на станціях sk19 and sk20: вертикальна лінія в а) показує час у вогнищі (час початку події: 12:54:14.8), а) який також отримано за інверсією хвильових форм (Malytskyy et al., 2025); б) версія фокального механізму, який отримано згідно із сейсмічним тензором

Наступним кроком у даній роботі є порівняльний аналіз отриманих синтетичних сейсмограм, розрахованих на основі методики математичного моделювання хвильового поля матричним методом (Пак, 2014, 2015) і спостережуваних записів для прямих Р- і S-хвиль на станції sk19. На рис. 3 наведено синтетичні та спостережені

форми прямих Р- і S-хвиль. Компоненти синтетичних сигналів E, N та Z у швидкостях обчислено для тензора моменту (рис. 2), отриманого внаслідок інверсії прямих Р- і S-хвиль для глибини вогнища 9 км та епіцентральної відстані 22,72 км з використанням швидкісної моделі, наведеної у табл. 1.

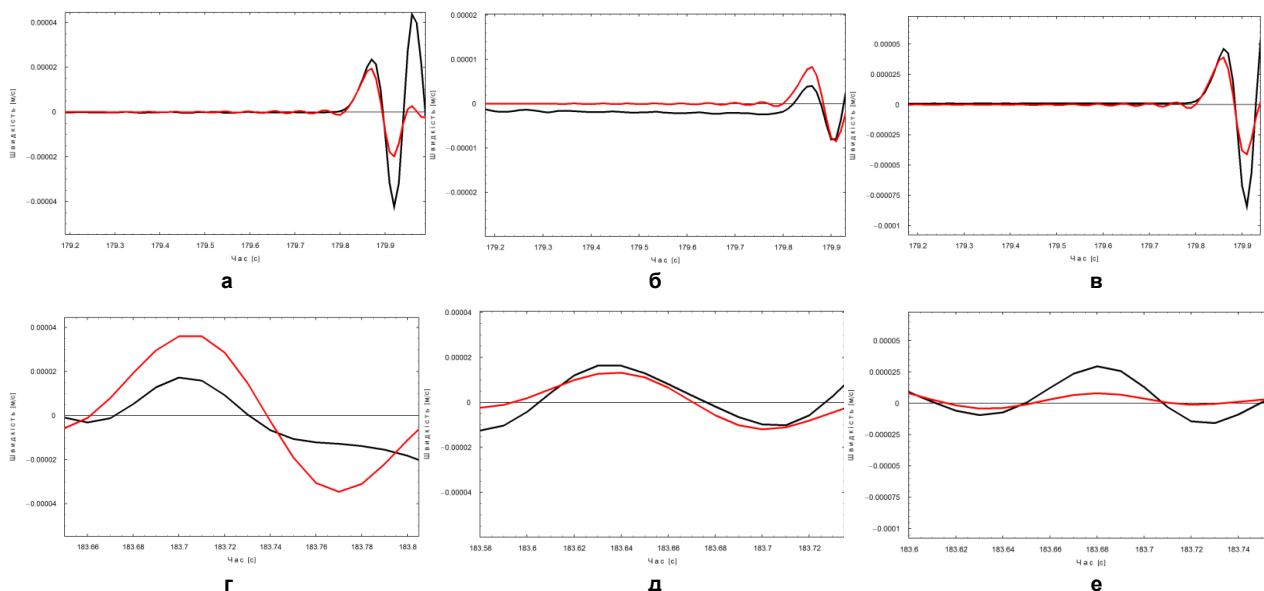


Рис. 3. Порівняльний аналіз прямих Р-хвиль:

а) N – компонента б) E – компонента в) Z – компонента і S-хвиль г) N – компонента д) E – компонента е) Z – компонента (для джерела на глибині 9 км) для спостережуваних і синтетичних сейсмограм, отриманих на станції sk19 з використанням швидкісної моделі, наведеної у таблиці 1. Спостережувані хвильові форми показано чорним кольором, а синтетичні – червоним відповідно

Тривалість імпульсу в джерелі та форму його часової функції вибрано такі, що найкраще відповідають тривалості та формі першого імпульсу на спостережених

записах. На рис. 4 наведено вигляд часової функції джерела та її амплітудний і фазовий спектри.

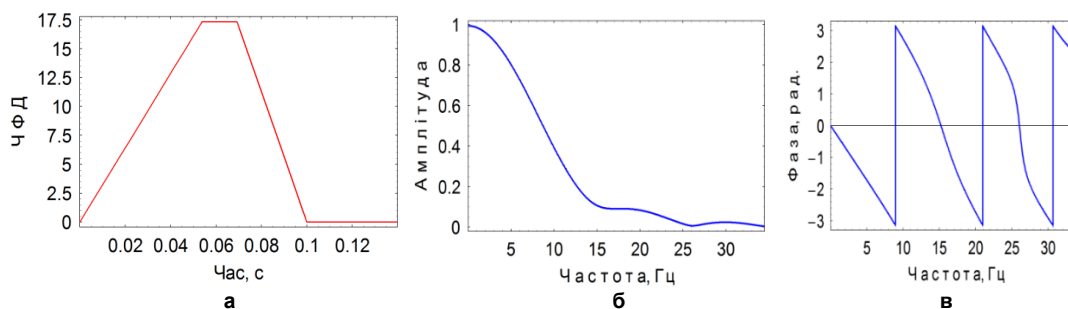


Рис. 4. Часова функція джерела у вигляді трапеції (а) та її амплітудний (б) і фазовий спектри (в). Тривалість імпульсу дорівнює 0,1 сек

Для кожної із фаз на рис. 3 вибрано візуально вікна, у яких проведено порівняння форм сигналів. Складові Р-хвилі для кожної компоненти розглянуто у вікні, яке починається за 0,6 сек до її вступу та закінчується через 0,2 сек після її вступу. Складові S-хвилі для кожної компоненти розглянуто у вікні, яке починається за 0,01 сек до її вступу та закінчується через 0,02 сек після її вступу. Вибір часової функції джерела у вигляді трапеції з тривалістю імпульсу 0,1 сек дає найкращий результат для порівняльного аналізу спостережуваних і синтетичних сейсмограм.

У роботі проведено кореляційний аналіз (Chiles, & Delfiner, 2012) прямих Р- і S-хвиль для спостережуваних і синтетичних сейсмограм (рис. 3), отриманих на станції sk19. Коефіцієнти кореляції для Р-хвилі на N-компоненті становить 0,82, на E-компоненті 0,84, на Z-компоненті 0,86.

Коефіцієнти кореляції для S-хвилі на N-компоненті становить 0,78, на E-компоненті 0,82, на Z-компоненті 0,80.

#### Дискусія і висновки

У даній роботі ми представили метод визначення тензора сейсмічного моменту, який отримано шляхом обернення тільки прямих хвиль, зареєстрованих на двох сейсмічних станціях sk19 (49.25°N, 21.93°E) і sk20 (49.21°N, 21.61°E) (рис. 1) Словацької мережі. Сейсмічні станції розташовані у різних квадрантах на фокальній сфері. Метод базується на підходах, які описано зокрема в роботах (Малицький, 2016), в яких версія матричного методу розвинута для обчислення переміщень тільки для прямих хвиль. Точкове джерело розміщено всередині шаруватого півпростору і представлено тензором сейсмічного моменту. Запропонований метод

протестовано на сейсмічній події у Східній Словаччині, яка відбулася 22 лютого 2024 р. (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). Вибір для інверсії тільки прямих хвиль замість повного хвильового поля дає змогу зменшити вплив швидкісної моделі. Крім того, слід відзначити, що в результаті обернення тільки прямих хвиль можна отримати також час початку сейсмічної події. Запропонований метод можна успішно використовувати для регіонів із малою сейсмічністю, де кількість сейсмічних станцій, які записали подію, обмежена.

Для достовірності отриманих результатів для сейсмічного тензора та фокального механізму автори провели порівняльний аналіз синтетичних та спостережуваних сейсмограм для прямих хвиль. Синтетичні сейсмограми розраховано на основі методики математичного моделювання хвильового поля матричним методом (Пак, 2015). Аналіз отриманих результатів на основі кореляційного аналізу показав високу достовірність результатів для тензора сейсмічного моменту для землетрусу 2024-02-22 (Східна Словаччина), які отримано шляхом обернення тільки прямих хвиль, записаних на станціях sk19 and sk20. Вважаємо, що використання точкового джерела, представленої сейсмічним тензором, яке розміщене всередині горизонтально-шаруватого півпростору можна використовувати для визначення фокальних механізмів.

**Внесок авторів:** Дмитро Малицький – концептуалізація, методологія, адміністрування проєкту; Олександра Асташкіна – програмне забезпечення, написання (перегляд і редагування); Руслан Пак – аналіз і обробка даних; Андрій Гнип – курація даних, візуалізація; Маркіян Добушовський – програмне забезпечення.

#### Список використаних джерел

- Малицький, Д. В. (2016). *Математичне моделювання в задачах сейсмології*. Наукова думка.
- Пак, Р. М. (2015). Моделювання хвильового поля, збуреного локальними джерелами у вертикально-неоднорідному півпросторі, та розрахунок синтетичних сейсмограм. *Геоінформатика*, 4(56), 35–42.
- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books.
- Asano, K., Sekiguchi, H., & Iwata, T. (2024). Validation of Deep Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Autocorrelation Functions of Strong Motion Records. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 24(5), 45–57. [https://doi.org/10.5610/jaee.24.5\\_45](https://doi.org/10.5610/jaee.24.5_45)
- Dreger, D. S., & Helmberger, D. V. (1993). Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data. *Journal of Geophysical Research*, 98(B1), 1162–1179.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 2825–2852.
- Chen, Y.-C., Huang, H.-C., Iwata, T., & Asano, K. (2019). Strong Ground Motion Simulation of the 2016 ML 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake Using the Empirical Green's Function Method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12905–12919. <https://doi.org/10.1029/2019JB017661>
- Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Hallo, M., & Gallovič, F. (2016). Fast and cheap approximation of Green function uncertainty for waveform-based earthquake source inversions. *Geophysical Journal International*, 207(2), 1012–1029.
- Kubo, H., Asano, K., Iwata, T., & Aoi, S. (2020). Along-dip variation in seismic radiation of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, earthquake (Mw 7.9) inferred using a multiple-period-band source inversion approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12), e2020JB019936. <https://doi.org/10.1029/2020JB019936>
- Malek, J., Brokesova, J., & Novotny, O. (2023). New velocity structure of the Novy Kostel earthquake – swarm region, West Bohemia, determined by the isometric inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 2111–2134.
- Malytskyy, D., & Asano, K. (2024). Seismic Moment Tensor and Focal Mechanism of the MW3.3 earthquake of May 11, 2021 in the Kyoto-Osaka Border Region Determined by Waveform Inversion. *Baltic Journal of Modern Computing*, 12(4), 434–442. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2024.12.4.05>
- Malytskyy, D., Fojtikova, L., Malek, J., Astashkina, O., Gnyp, A., Dobushovskyy, M., Pak, R., Melnyk, M., Nikulins, V., & Ignatyshyn, V. (2025). Seismic moment tensor and focal mechanism for earthquake of February 22, 2024 in Eastern Slovakia (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). *Геофізичний журнал* (у друці).

Minson, S. E. (2024). Cross-fade sampling: extremely efficient Bayesian inversion for a variety of geophysical problems. *Geophysical Journal International*, 239(3), 1629–1649.

Schlomer, A., Hetenyi, G., Plomerova, J., Vecsey, L., Bielik, M., Bokelmann, G., Csicsay, K., Fojtikova, L., Friederich, W., Fuchs, F., Grad, M., Janik, T., Exnerova, H., K., Kolinsky, P., Malinowski, S., Meier, T., Mendecki, M., Papco, J., Szucs, E., Sule, B., Timko, M., Gyarmati, A., Weber, Z., Westergom, V., Zlebcikova, H., & AlpArray-PACASE Working Group. (2024). The Pannonian-Carpathian-Alpine seismic experiment (PACASE): network description and implementation. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 59, 249–270. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00439-w>

Stiernström, V., Almquist, M., & Dunham, E. M. (2024). Adjoint-based inversion for stress and frictional parameters in earthquake modeling. *Journal of Computational Physics*, 519, 113447.

Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89–93.

Vavryčuk, V., & Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time-frequency approach. *Geophysical Journal International*, 190(3), 1761–1776. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05592.x>

#### References

- Aki, K., & Richards, P. G. (2002). *Quantitative seismology*. University Science Books.
- Asano, K., Sekiguchi, H., & Iwata, T. (2024). Validation of Deep Velocity Structure Model in the Kyoto and Nara Basins Using Autocorrelation Functions of Strong Motion Records. *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, 24(5), 45–57. [https://doi.org/10.5610/jaee.24.5\\_45](https://doi.org/10.5610/jaee.24.5_45)
- Chen, Y.-C., Huang, H.-C., Iwata, T., & Asano, K. (2019). Strong Ground Motion Simulation of the 2016 ML 6.6 Meinong, Taiwan, Earthquake Using the Empirical Green's Function Method. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(12), 12905–12919. <https://doi.org/10.1029/2019JB017661>
- Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (2nd ed.). Wiley-Interscience.
- Dreger, D. S., & Helmberger, D. V. (1993). Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data. *Journal of Geophysical Research*, 98(B1), 1162–1179.
- Dziewonski, A. M., Chou, T. A., & Woodhouse, J. H. (1981). Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity. *Journal of Geophysical Research*, 86(B4), 2825–2852.
- Hallo, M., & Gallovič, F. (2016). Fast and cheap approximation of Green function uncertainty for waveform-based earthquake source inversions. *Geophysical Journal International*, 207(2), 1012–1029.
- Kubo, H., Asano, K., Iwata, T., & Aoi, S. (2020). Along-dip variation in seismic radiation of the 2011 Ibaraki-oki, Japan, earthquake (Mw 7.9) inferred using a multiple-period-band source inversion approach. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(12), e2020JB019936. <https://doi.org/10.1029/2020JB019936>
- Malek, J., Brokesova, J., & Novotny, O. (2023). New velocity structure of the Novy Kostel earthquake – swarm region, West Bohemia, determined by the isometric inversion. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 2111–2134.
- Malytskyy, D., & Asano, K. (2024). Seismic Moment Tensor and Focal Mechanism of the MW3.3 earthquake of May 11, 2021 in the Kyoto-Osaka Border Region Determined by Waveform Inversion. *Baltic Journal of Modern Computing*, 12(4), 434–442. <https://doi.org/10.22364/bjmc.2024.12.4.05>
- Malytskyy, D., Fojtikova, L., Malek, J., Astashkina, O., Gnyp, A., Dobushovskyy, M., Pak, R., Melnyk, M., Nikulins, V., & Ignatyshyn, V. (2025). Seismic moment tensor and focal mechanism for earthquake of February 22, 2024 in Eastern Slovakia (12:54:15 UTC, 21.75°E, 49.03°N, depth 9 km, ML3.0). *Геофізичний журнал* (у друці).
- Malytskyy, D. V. (2016). *Mathematical modeling in seismology problems*. Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Minson, S. E. (2024). Cross-fade sampling: extremely efficient Bayesian inversion for a variety of geophysical problems. *Geophysical Journal International*, 239(3), 1629–1649.
- Pak, R. M. (2015). Modeling of a wave field perturbed by local sources in a vertically inhomogeneous half-space and calculation of synthetic seismograms. *Geoінformatics*, 4(56), 35–42 [in Ukrainian].
- Schlomer, A., Hetenyi, G., Plomerova, J., Vecsey, L., Bielik, M., Bokelmann, G., Csicsay, K., Fojtikova, L., Friederich, W., Fuchs, F., Grad, M., Janik, T., Exnerova, H., K., Kolinsky, P., Malinowski, S., Meier, T., Mendecki, M., Papco, J., Szucs, E., Sule, B., Timko, M., Gyarmati, A., Weber, Z., Westergom, V., Zlebcikova, H., & AlpArray-PACASE Working Group. (2024). The Pannonian-Carpathian-Alpine seismic experiment (PACASE): network description and implementation. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 59, 249–270. <https://doi.org/10.1007/s40328-024-00439-w>
- Stiernström, V., Almquist, M., & Dunham, E. M. (2024). Adjoint-based inversion for stress and frictional parameters in earthquake modeling. *Journal of Computational Physics*, 519, 113447.
- Thomson, W. T. (1950). Transmission of elastic waves through stratified solid medium. *Journal of Applied Physics*, 21(2), 89–93.
- Vavryčuk, V., & Kuhn, D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time-frequency approach. *Geophysical Journal International*, 190(3), 1761–1776. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05592.x>

Отримано редакцію журналу / Received: 10.04.25

Прорецензовано / Revised: 21.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25



Dmytro MALYTSKYI<sup>1</sup>, DSc. (Phys.-Math.), Prof.  
ORCID ID: 0000-0002-9156-739x  
e-mail: dmalytskyi@gmail.com

Oleksandra ASTASHKINA<sup>1</sup>, PhD (Geol.), Senior Researcher  
ORCID ID: 0009-0004-2065-4236  
e-mail: sac1@ukr.net

Ruslan PAK<sup>1</sup>, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0001-8781-4688

Andriy GNYP<sup>1</sup>, PhD (Phys.-Math.), Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0002-2612-4234  
e-mail: agnyp.gm@gmail.com

Markiyan DOBUSHOVSKYY<sup>1</sup>, PhD (Phys.-Math.), Junior Researcher  
ORCID ID: 0009-0004-4358-2298  
e-mail: mdobush13@gmail.com

Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

## DETERMINATION OF EARTHQUAKE SOURCE PARAMETERS BASED ON DATA FROM A LIMITED NUMBER OF SEISMIC STATIONS

**Background.** This paper presents a method for determining the seismic moment tensor using only direct P- and S-waves, which are less sensitive to modeling effects of wave propagation than reflected and refracted waves, significantly improving the accuracy and reliability of the method. The earthquake source is considered as a point source with a known location and origin time.

**Methods.** Wave propagation in a medium modeled as a set of horizontally homogeneous elastic layers is calculated using the matrix method, which allows isolating only direct waves. Based on the forward problem and the solution of the generalized inversion, an inversion algorithm for observed waveforms to determine the components of the seismic moment tensor  $M(t)$  is presented. The analysis is conducted based on records of the earthquake that occurred on February 22, 2024, in Eastern Slovakia, using data from only two seismic stations of the Slovak network: sk19 (49.25°N, 21.93°E) and sk20 (49.21°N, 21.61°E).

**Results.** To verify the reliability of the obtained earthquake source parameters, a comparative analysis was conducted between synthetic seismograms, calculated using the wavefield modeling methodology based on the matrix method, and observed records of direct P- and S-waves at station sk19. A correlation analysis of direct P- and S-waves for observed and synthetic seismograms was performed. The results of the analysis demonstrated a high reliability of the determined seismic moment tensor for the February 22, 2024 earthquake (Eastern Slovakia), obtained through inversion using only direct waves.

**Conclusions.** The use of a point source represented by a seismic moment tensor, placed within a horizontally stratified half-space, is an effective approach for determining earthquake focal mechanisms. The study results confirm the feasibility of using only direct P- and S-waves for determining the seismic moment tensor, which enhances computational accuracy and reduces the impact of modeling effects on wave propagation.

**Keywords:** seismic moment tensor, focal mechanism, matrix method, synthetic seismograms, correlation analysis.

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 549.08

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.09>

Zohir MEKTI<sup>1</sup>, Dr in Mining Engineering  
ORCID ID: 0000-0002-6153-7026  
e-mail: zohir.mekti@univ-annaba.dz

Assia BOUTEMEDJET<sup>1</sup>, Dr in Mining Engineering  
ORCID ID: 0009-0007-4644-3914  
e-mail: Assia.boutemedjet@univ-annaba.dz

Tourkia TAHRI<sup>2</sup>, Dr in Mining Engineering  
ORCID ID: 0000-0002-3953-9914  
e-mail: tourkia.tahri@univ-bejaia.dz

Aissa BENSELHOUB<sup>3,4,5</sup>, PhD in Ecology and Environment Protection  
ORCID ID: 0000-0001-5891-2860  
e-mail: benselhoub@yahoo.fr

Abdelmohsen M. SOLIMAN<sup>6</sup>, Senior Researcher  
e-mail: amsolimannrc@gmail.com

Stefano BELLUCCI<sup>5,7</sup>, Senior Researcher  
ORCID ID: 0000-0003-0326-6368  
e-mail: bellucci@Inf.infn.it

<sup>1</sup>Laboratory of Valorization of Mining Resources and Environment, Mining Department, Badji Mokhtar University, Annaba, Algeria

<sup>2</sup>University Abderahmane Mira, Faculty of Technology, Laboratory of Materials Technology and Process Engineering (LTMGP) Bejaia, Algeria

<sup>3</sup>University of Vienna, Vienna, Austria

<sup>4</sup>Environmental Research Center (C.R.E), Annaba, Algeria

<sup>5</sup>INFN-Laboratori Nazionali di Frascati, Frascati, Italy

<sup>6</sup>Therapeutic Chemistry Department, National Research Centre of Egypt, Cairo, Egypt

<sup>7</sup>National Institute of Materials Physics, Bucharest, Romania

## PETROGRAPHIC CHARACTERIZATION OF THE URANIUM ORE OF TAHAGGART (EL-HOGGAR, SE ALGERIA)

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

**Background.** Algeria has long sought to exploit its uranium deposits in the Hoggar region, whose objective is to market the ore, and use part of the production exclusively in the civil field, especially in electricity generation. The exploitation and valorisation of this ore; require a very specific process of exploitation, characterization and treatment.

The main objective of this work is to establish a detailed and complete technical data sheet for the Tahaggart deposit, enabling the implementation of a uranium ore mining and beneficiation technique to obtain a marketable product known as "yellow cake".

**Methods.** To achieve this objective, samples were taken from the site under study, followed by microscopic and macroscopic analyses non-thin sections to obtain petrographic, mineralogical and geochemical identifications.

**Results.** The analyses confirmed the sandstone character of the ore and the predominance of quartz, clays, oxides and iron hydroxides as well as uranium and rutile minerals. The uranium contents in the mineralized altered levels varied from 0.90 to 1.32 % and from 0.34 to 0.74 % in the mineralized conglomeratic sandstones. Uranium occurred either in the high-grade uranium minerals or in low-grade apatite, zircon, rutile, and in traces in monazite.

**Conclusions.** Different studies carried out on the Tahaggart region have proven the presence of Uranium ores with remarkable quantities, varying between 0.90 to 1.32 % in the mineralized altered levels and 0.34 to 0.74 % in the mineralized conglomeratic sandstones, however, despite this, and in view of the strategic value that uranium enjoys at the international level; to date, there is no exploitation of this mine by the state. The best treatment method in this case is heap leaching; the recovery rate by this method can reach 70 % in uranium as "yellow cake".

**Keywords:** Uranium, Tahaggart, Petrographic characterization, Mineralogy and geochemistry, Leaching, "yellow cake".

### Background

The element uranium was discovered in 1789 by the German chemist Martin-Heinrich Klaproth (Graubünden and Souidi, 2020). More than a century later, in 1896, Henri Becquerel discovered radioactivity from fluorescent uranium salts and at the same time demonstrated the radioactive properties of this element (Giry, 2017). Originally, uranium was only used as a chemical agent, notably in the ceramics and mirror-making industry (glass coloring), then in the manufacture of high-strength steel (Nilson and al., 2019). In the early 20th century, following Pierre and Marie Curie's work on radioactivity, its ores were an essential source of radium, used to treat cancerous tumors (Rentetzi, 2022).

The discovery of nuclear fission by Otto Hahn and Fritz Strassmann in 1938 marked the baptism of nuclear energy

and the use of uranium as a fuel element (Reed, 2020). Uranium in metallic form, can also be found as a structural element (counterweight) in aircraft and marine construction, as well as in the military field, for tank armouring and shell manufacture (Lourenco and al., 2016; Carvalho and al., 2023). It can also serve as shielding to protect against ionizing radiation, just like lead (Lourenco et al., 2016). Uranium is the main element used for the manufacture of fuel elements for nuclear reactors (Zerbib, 2024). However, its use goes through several stages of preparation called the nuclear fuel cycle. The first step in this cycle is the exploration, exploitation and valorization of uranium ores. The latter requires a specific treatment process, taking into account the technical sheet of the uranium ore. Algeria has significant mineral reserves, in particular, gold and uranium

are the main metals present in Hoggar. Tin, tungsten and tantalum, niobium, and copper indices are also present.

There are several uranium deposits identified and not exploited to date: Timgaouine, Abankor, Tinef and Tahaggart. Exploitation of a deposit requires a perfect understanding of its geographical environment, geology and geometry, and for profitable extraction of the raw material and valorization of this resource, in our case uranium in the Tahaggart deposit, it is imperative to establish a detailed and complete technical data sheet for the uranium ore. The first geological studies were carried out by Joulia (1959), Lessard (1961) and Claret et Tempère (1968), Legrand (1970), Fabre (1971) and Beuf et al (1971), who studied the Paleozoic history of the Saharan platform in the Tassili region or at N'Ahaggar de In Debirène in the southwest and in the Tin-Eggole region in the northeast. Mokadem carried out a study on the uranium mineralization of the Tin Séririne sedimentary basin (Tahaggart deposit and the Tamert-N-Iblis region) in 1980, followed by a study of the alteration of the Precambrian base on the periphery of the basin. In addition, the associated uranium and thoriferous mineralization (Hallalouche, 1995), and a structural study of the Tin Séririne basin were made using geophysical methods (Bournas, 1998).

A contribution to the geological and gītological study of the uranium mineralization of Tahaggart (Southeast of Hoggar): mineralogy and geochemistry of mineralization linked to alterations of the base and to the basic conglomerate of the detrital series was the subject of a magister thesis by Chahdane in 2009. Algeria began the first prospecting work in the Tin-Séririne basin around the 1970s. The aim of this work was to search for uranium in the northern district of the Algerian-Nigerian uranium province. The Romanian group GEOMIN (1969–1975) working on behalf of SONAREM (Société Nationale de Recherche et d'Exploitation Minière) highlighted the Tahaggart uranium deposit and the Timouzeline and Tamert-N-Iblis uranium indices. These mineralized zones were discovered by ground verification of the radiometric anomalies highlighted

by the aero-magneto-spectrometric survey at 1/200,000, carried out by the American firm Aéroservice (1971).

A reserve estimate has been made for the Tahaggart deposit. A SONAREM team (1976–1977) carried out hydrogeological research work in the Tin Séririne basin. From 1986 to 2005, uranium exploration work was carried out on the eastern and western flanks (Timouzeline and Tamert-N-Iblis) of the Tin-Séririne Basin (CREM, 1986–1991); on its northern and north-western periphery (CREM, 1991–1992), and its southern part (CREM, 1996–1997), as well as evaluation and extension work on the Tahaggart deposit (COMENA (2001–2005). Appreciable results were obtained in the Tin-Séririne basin, notably the identification and confirmation of uranium indices and anomalies. The present work represents a contribution to the enrichment of the Tahaggart uranium ore datasheet, through the petrographic (macro and microscopic), mineralogical and geochemical characterization of the main horizons, represented by the conglomeratic sandstones and alteration facies of which they are composed.

**Site description.** The Tahaggart uranium deposit is located 350 km southeast of Tamanrasset in the Tin Séririne basin in extreme southeastern Algeria; close to the Niger border (Rabia-Zaourar, 1978; Badahmaoui et al., 2020) (fig. 1). This desert region is characterized by very low human density, with altitudes ranging from 1,000 m in the north, to 400 m in the south on the Algerian-Nigerian border. Temperatures ranging from 40–45 °C (April to July) and from 13 to 11 °C (January to February), very little rainfall, vegetation limited to wadi beds, and fauna specific to desert zones (Chahdane, 2009; Khaldi et al., 2018). It is located at the crystalline basement-Paleozoic sedimentary cover contact, with global uranium reserves estimated at 8,105t of ore grading 0.215 % U, or 1,700 tonnes of U metal (Allek et al., 2013). It occurs as subhorizontal mineralized lenses 1 to 8 m thick hosted in altered Precambrian basement gneisses and Cambro-Ordovician basal conglomerates (Baadi, 2018; Gherbi et al., 2015).

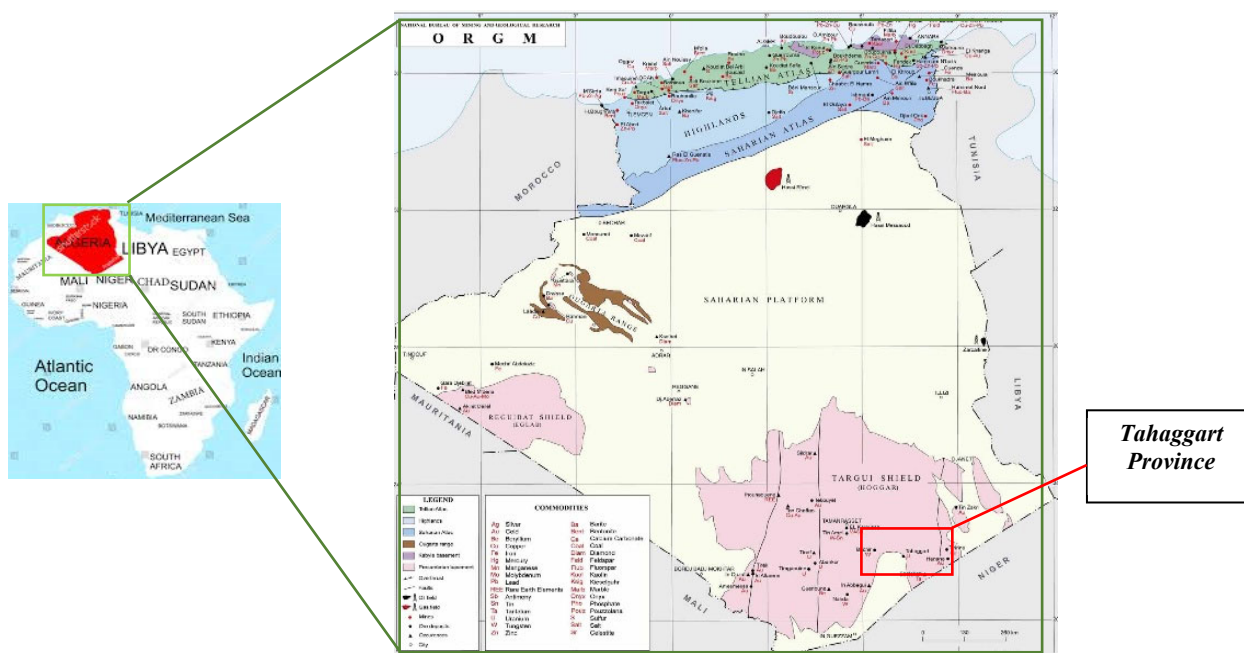


Fig. 1. Location map of study area

Uranium mineralization, is known at surface and sub-surface depths of 0 to 8 m, and occurs in more or less

discontinuous patches (Sanguinetti et al., 2018; Smirnov et al., 2018). The uranium ore essentially contains secondary



uranium minerals (utunite, torbernite), associated with iron oxides (hematite, goethite) and a clay matrix (Hatert et al., 2018). Significant thorium and rare-earth mineralization associated with conglomerates (Bonhoure, 2010; Boni et al., 2023); is related to primary and secondary minerals (monazite) and aluminophosphates (grandallite, florencite, brockite). Other secondary uraniferous minerals include carnotite, sabugalite and uranophane (Chahdane, 2009).

### Methods

The samples were taken to cover most of the region studied. The diameter of the collected pieces varies from 0 to 250 mm; they are taken from conglomeratic sandstone ores and altered facies, then the diameter of the pieces of rocks was reduced using a hammer to sizes which do not exceed 90 mm. The pieces obtained from conglomeratic sandstone ore are intended for macroscopic observation with the naked eye, while microscopic observation was carried out using a Leica binocular optical microscope. Samples were selected to prepare thin sections of uranium ore.

To determine the chemical composition of the rocks, 19 samples were taken, 9 from conglomeratic sandstones and 10 from mineralized alteration rock, each sample was crushed using a Model HERZOG disc crusher, then mixed

and divided by quartering technique, to obtain a representative sample. Prior to FRX analysis, all samples were pulverized using a Model SIEBTECHNIK pulverizer. Preparation of the thin section for microscopic and petrographic study involved the following stages: the ore rock was cut by a BROTLAB diamond disk saw, then the samples were ground in a BROTLAB automatic diamond-grinding machine, followed by manual polishing, and finally GBS1 resin was used to bond the resulting section to special glass chips. The prepared thin sections were placed on the stage of a polarizing optical microscope (Leitz PoL 12 in PLNA in APL). The chemical composition was determined by X-ray fluorescence analysis, using a portable X-ray fluorescence spectrometer (Thermo Fisher-Niton xl3t Goldtdt+). This analysis made it possible to obtain results for each type of sample, its chemical composition and the content of each chemical element.

**Macroscopic study of uranium ore associated with conglomeratic sandstones.** Macroscopic observation of conglomeratic sandstones reveals the presence of 06 arenas (Fig. 2). The first facies, Uranium-mineralized alteration arena, has a ferruginous clay-quartz matrix.

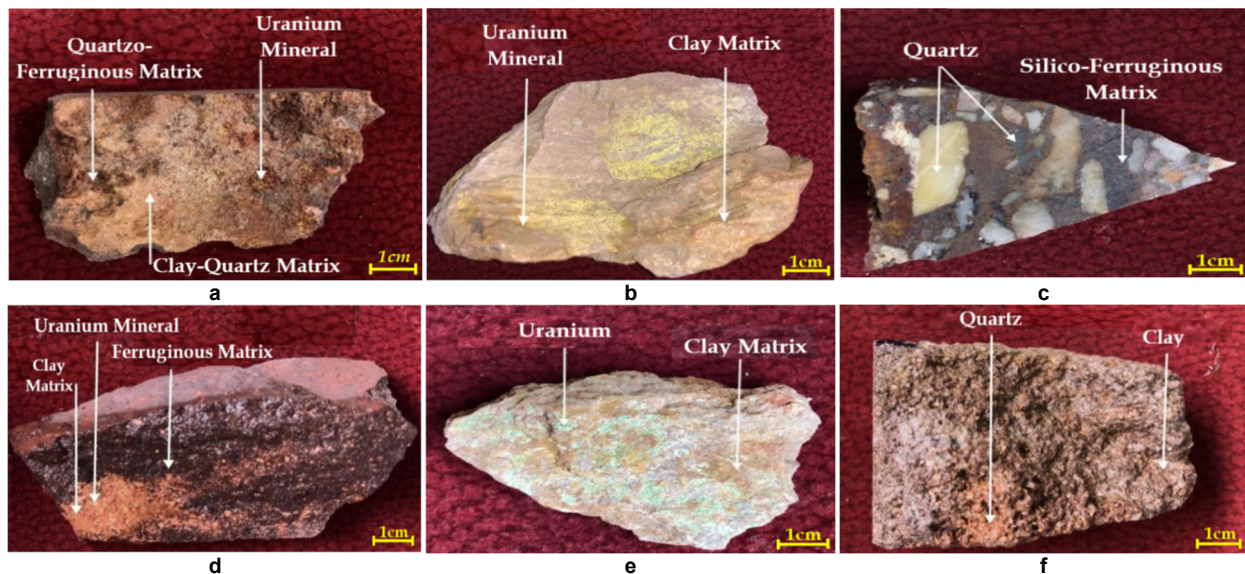


Fig. 2. Macroscopic observation of conglomeratic sandstones

This matrix is composed of clays and quartz grains of size varying between 1 mm and a few microns, impregnated with reddish iron oxides. Within this matrix there appear yellowish uranium minerals (Fig. 2a). The second arena is mineralized clay, essentially composed of a whitish-gray clay matrix containing 1–2 mm thick quartz beds and yellow uranium minerals. The latter appear as coatings plated onto the matrix (Fig. 2b). In the mineralized microconglomerate arena within a silico-ferruginous matrix, centimetric to millimetric quartz grains appear, whitish to grayish in color. These quartz grains are generally xenomorphic and angular, and sometimes sub-rounded. A few yellowish uranium minerals appear in the ferruginous matrix (Fig. 2c). In addition to a ferruginous-clay matrix, the mineralized ferruginous arena is also composed of clay pockets containing a few disseminated grains of uranium (Fig. 2d). The fifth arena is the mineralized ferruginous-clay arena. Green uranium films of millimetric to centimetric dimensions appear within this clay matrix. The clay matrix is

grayish and whitish-gray in color, with several planes of schistosity. Greenish uranium minerals sometimes permeate these schistose planes (Fig. 2e). The last arena is the quartz-clay arena. Within this whitish clay matrix, there are agglomerations and sheaves of whitish to grayish quartz grains (Fig. 2f). Under Leica binocular microscope in direct light, the different observed matrices of the samples studied are:

- A quarto-ferruginous matrix with small fine millimeter to micrometer quartz grains (Fig. 3a).
- A clay-ferruginous matrix with green uranium films (Fig. 3b);
- A quartz-ferruginous matrix with uranium grains scattered everywhere and sometimes iron oxides coated with clays (Fig. 3c);
- A clay-iron matrix, with clay particles in the form of microveins intercalated between quartz and iron oxide (Fig. 3d).

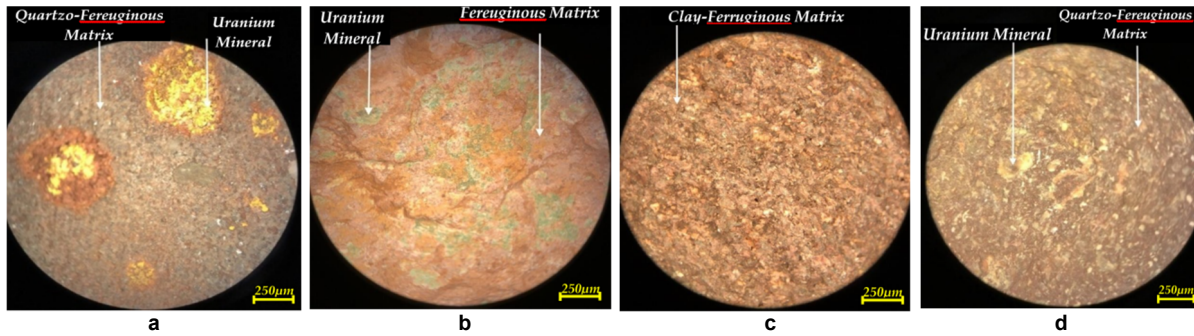


Fig. 3. Microscopic observation of matrices (x40)

**Petrographic study of conglomeratic sandstones in thin sections.** In polarized light not analyzed (PLNA), conglomeratic sandstones are composed of Quartz, in the form of grains of various sizes (millimeter to micrometer) (Fig. 4). These grains are rounded and sub-rounded and sometimes sub-automorphic. Quartz is often surrounded by discontinuous halos of secondary silica. It is also fissured, and the micro-fissures are sometimes filled with iron oxides and uranium minerals (Fig. 4a). Iron oxides, these are abundant, appearing as fillers in interstices and intergranular spaces, as well as in micro-fissures in quartz grains. Two generations of iron oxides are present. These oxides also imprint on the clay minerals present in the inter-granular

spaces (Fig. 4b). Clay minerals are not abundant and appear in the intergranular spaces often impregnated with iron oxides, and appear in small aggregates and in the form of small vermicular. According to studies carried out by Hallalouche, 1995 and Chahdane, 2009, these clays appear only as kaolinite (Fig. 4c). Accessory minerals occupy the intergranular spaces and appear as crystals of zircon and monazite (Fig. 4d). Uranium minerals in the Tahaggart are found mainly in carnotite ( $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$ ) and autunite ( $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$ ) (Mokadem, 1980, Hallalouche, 1995, Chahdane, 2009) also reported the presence of weeksite ( $K_2(UO_2)_2Si_6O_{15} \cdot 4(H_2O)$ ) (Fig. 5).

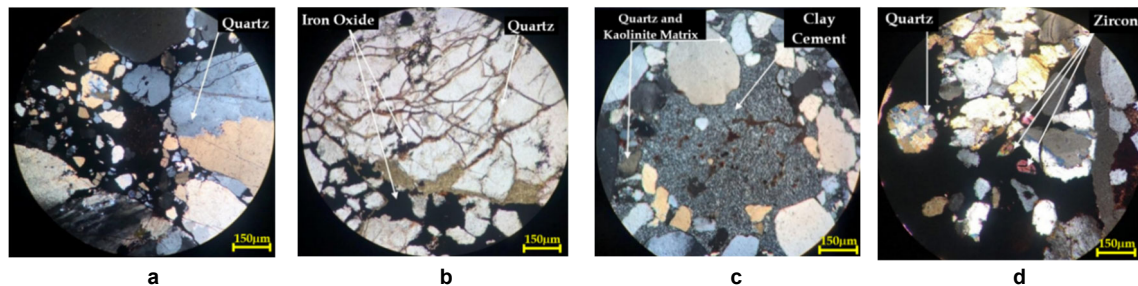


Fig. 4. Minerals in conglomeratic sandstones

Note that uranium ores contain yellow to golden-yellow minerals (in polarized light analyzed by PLA), sometimes canary-yellow, filling micro-fissures in quartz and

surrounding its grains, and appearing as small aggregates in the inter-granular spaces (Frankland et al., 2022; Aissa et al., 2022).

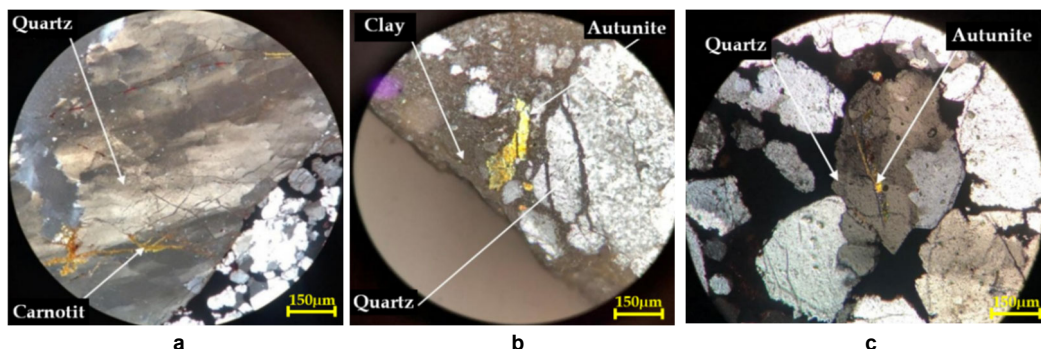


Fig. 5. Uranium minerals in conglomeratic sandstones

**Study of uranium ore associated with clay-quartz alterations.** In this section, we will use the microscopic study of uranium minerals in mineralized alterations. We find autunite  $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 10-12H_2O$ , golden yellow to lemon yellow fluorescing in green, it occurs as prismatic crystals, flattened tablets and as aggregates (Frankland, 2020). Autunite often occurs as disseminations within kaolinite,

filling microcracks in quartz and as flattened tablets within the clay matrix and in quartz cracks (Fig. 6).

Torbernite  $Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$  occurs as veinlets and tablets, with a pale yellow to greenish-yellow color in natural light (NL), and a blue tint in polarized light (PL) (Syczewski, 2023). It also appears as microcrystalline aggregates within the clay matrix and iron oxides, filling fissures, flattened tablets and automorphic crystals (Fig. 7).



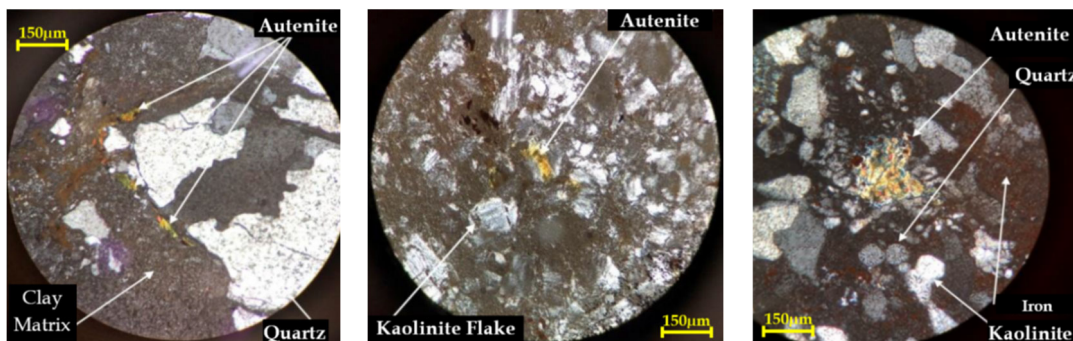


Fig. 6. Autenite in the clay matrix



Fig. 7. Torbernite in the clay matrix

Metatorbernite  $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 2.8\text{H}_2\text{O}$ , in natural light (NL), shows pale green, pale blue to colorless hues similar to those of torbernite, with the transition in polarized light (PL) to a dark blue to purplish-blue color (Descostes, 2017) (Fig. 8). It appears as crack filling and in the form of small

tablets within the clay matrix. Observation also shows that metatorbernite can be observed on the edges of sheets, and filling the inter-sheet spaces of flakes and packets in the clay matrix (kaolinite).

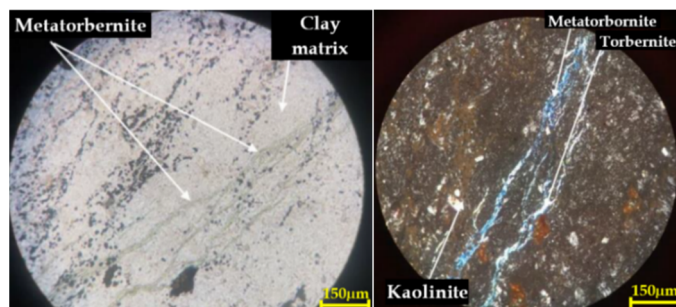


Fig. 8. Metatorbernite in clay matrix

**Chemical characterization of Tahaggart uranium ores.** Several Tahaggart ore samples, composed of conglomeratic sandstones and mineralized alteration rocks, have been analyzed by X-Ray fluorescence (XRF). Chemical analysis was carried out using a portable X-ray fluorescence spectrometer Thermo Ficher-Niton xl3t Goldt+) (Jarc, 2022), which enabled us to obtain its chemical composition for each type of sample.

#### Analysis of uranium ore associated with conglomeratic sandstones

**Major elements.** In samples related to conglomeratic sandstones, silica ( $\text{SiO}_2$ ) remains very abundant and omnipresent. Clays ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) are also quite abundant in this facies (Tab. 1 and Fig. 9); magnesium, iron, and potassium are also present in moderate amounts; the other major elements ( $\text{CaO}$ ,  $\text{VO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ , etc.) appear at low concentrations.

Table 1

| Concentrations of major elements in conglomeratic sandstones (%) |         |         |         |         |         |        |         |         |        |
|------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|--------|
| Element                                                          | Samp1   | Samp2   | Samp3   | Samp4   | Samp5   | Samp6  | Samp7   | Samp8   | Samp9  |
| $\text{P}_2\text{O}_5$                                           | 0.5151  | 0.5334  | 0.5135  | 0.2705  | 0.0000  | 0.0012 | 0.0000  | 0.0000  | 0.0879 |
| $\text{K}_2\text{O}$                                             | 1.5207  | 12.7147 | 1.2684  | 1.0578  | 0.1273  | 0.0011 | 0.0260  | 0.7057  | 2.3978 |
| $\text{VO}_2$                                                    | 0.4118  | 0.3881  | 0.3879  | 0.3748  | 0.3325  | 0.0009 | 0.0511  | 0.0948  | 0.0000 |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$                                          | 5.0962  | 4.9827  | 4.7962  | 4.6176  | 1.0970  | 0.0005 | 2.4439  | 5.6508  | 0.0395 |
| $\text{CaO}$                                                     | 1.6432  | 1.6234  | 1.5183  | 1.0844  | 0.1251  | 0.0004 | 0.0298  | 0.0278  | 2.2062 |
| $\text{TiO}_2$                                                   | 0.6943  | 1.0106  | 0.7830  | 0.4519  | 2.6446  | 0.0009 | 0.7953  | 1.0133  | 0.0000 |
| $\text{SiO}_2$                                                   | 37.8529 | 37.0517 | 39.4210 | 53.1192 | 74.1155 | 0.0005 | 84.3836 | 62.9949 | 0.0832 |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$                                          | 8.1733  | 8.1800  | 8.4656  | 7.1862  | 18.6610 | 0.0023 | 10.8930 | 0.7523  | 0.0000 |



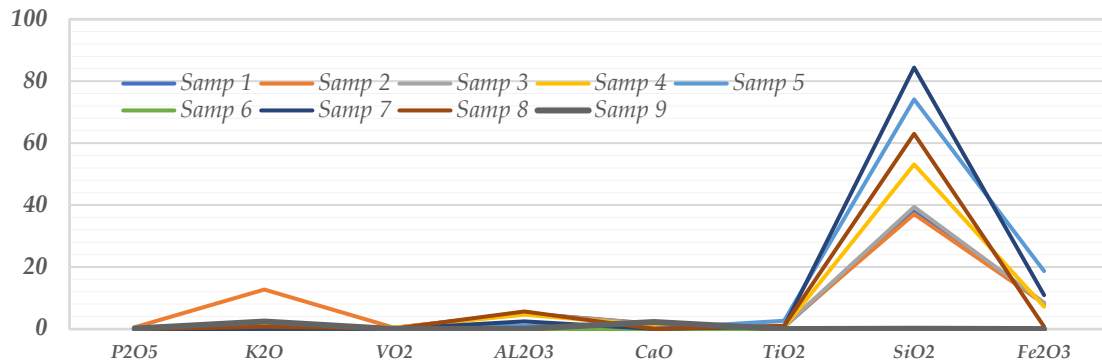


Fig. 9. Evolution of concentrations of major elements in conglomeratic sandstones

**Trace elements**

The results obtained show the presence of uranium from medium to high concentrations and high potassium and vanadium contents in conglomeratic sandstones. These are

the uranium minerals manifested, in particular by Carnotite. Zirconium and magnesium are also present but with moderate levels; copper and thorium have very low contents (Tab. 2 and Fig. 10).

Table 2

Trace element concentrations in conglomeratic sandstones (ppm)

| Element | Samp1    | Samp2    | Samp3    | Samp4   | Samp5   | Samp6   | Samp7  | Samp8   | Samp9    |
|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|---------|----------|
| U       | 5859.72  | 6432.53  | 7347.42  | 6226.62 | 3385.60 | 1262.73 | 59.95  | 5097.89 | 5133.29  |
| Zr      | 280.98   | 325.85   | 404.15   | 249.31  | 1281.97 | 115.21  | 701.43 | 569.08  | 1.52     |
| Cu      | 233.73   | 246.58   | 212.05   | 124.71  | 0.00    | 35.19   | 16.97  | 12.38   | 0.00     |
| V       | 2529.40  | 2384.13  | 2382.91  | 2302.12 | 2042.56 | 5.76    | 314.43 | 582.80  | 0.00     |
| K       | 12624.52 | 10552.95 | 10530.05 | 8782.07 | 1057.15 | 9.55    | 215.90 | 5858.58 | 19905.95 |
| Th      | 9.15     | 15.10    | 11.16    | 9.95    | 94.17   | 24.99   | 37.11  | 68.93   | 0.00     |
| Cs      | 0.00     | 0.00     | 0.00     | 0.00    | 0.00    | 2.83    | 0.00   | 0.00    | 0.00     |
| Mg      | 2209.16  | 2937.74  | 2846.20  | 0.00    | 0.00    | 4.29    | 0.00   | 2079.66 | 970.39   |

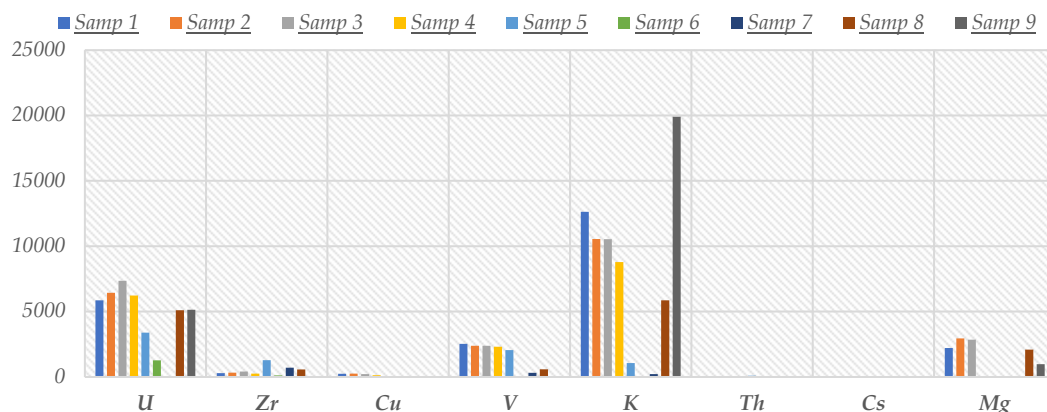


Fig.10. Evolution of concentrations of trace elements in conglomeratic sandstones

**Analysis of uranium ore associated with clay-quartz alterations****Major elements**

Silica ( $\text{SiO}_2$ ) is very abundant in clay-quartz alteration samples, with high concentrations of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , associated with

clays (Tab. 3 and Fig. 11); magnesium and iron are also present in moderate quantities, the other major elements ( $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,...) are present in very low concentrations.

Table 3

Concentrations of major elements in alteration samples (%)

| Element                 | Samp1 | Samp2 | Samp3 | Samp4 | Samp5 | Samp6 | Samp7 | Samp8 | Samp9 | Samp10 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0.80  | 13.79 | 9.19  | 12.90 | 14.00 | 11.70 | 12.32 | 15.98 | 8.54  | 12.27  |
| $\text{CaO}$            | 0.18  | 0.22  | 0.04  | 0.07  | 0.07  | 0.03  | 0.05  | 0.32  | 0.20  | 0.07   |
| $\text{FeO}$            | 3.88  | 3.25  | 0.09  | 0.14  | 0.12  | 0.11  | 1.28  | 0.23  | 0.17  | 0.24   |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 4.55  | 0.69  | 0.19  | 0.16  | 0.05  | 0.24  | 0.25  | 0.47  | 2.09  | 0.93   |
| $\text{MgO}$            | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.00  | 0.50  | 0.25  | 0.00   |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0.10  | 0.07  | 0.16  | 0.27  | 0.22  | 0.13  | 0.13  | 0.25  | 0.38  | 0.32   |
| $\text{VO}_2$           | 0.00  | 0.02  | 0.09  | 0.02  | 0.02  | 0.01  | 0.01  | 0.08  | 0.02  | 0.08   |
| $\text{SiO}_2$          | 54.02 | 44.62 | 53.61 | 46.60 | 50.69 | 61.81 | 58.06 | 38.37 | 31.59 | 26.41  |
| $\text{TiO}_2$          | 0.51  | 0.85  | 0.36  | 0.36  | 0.25  | 0.26  | 0.45  | 2.22  | 0.67  | 1.87   |

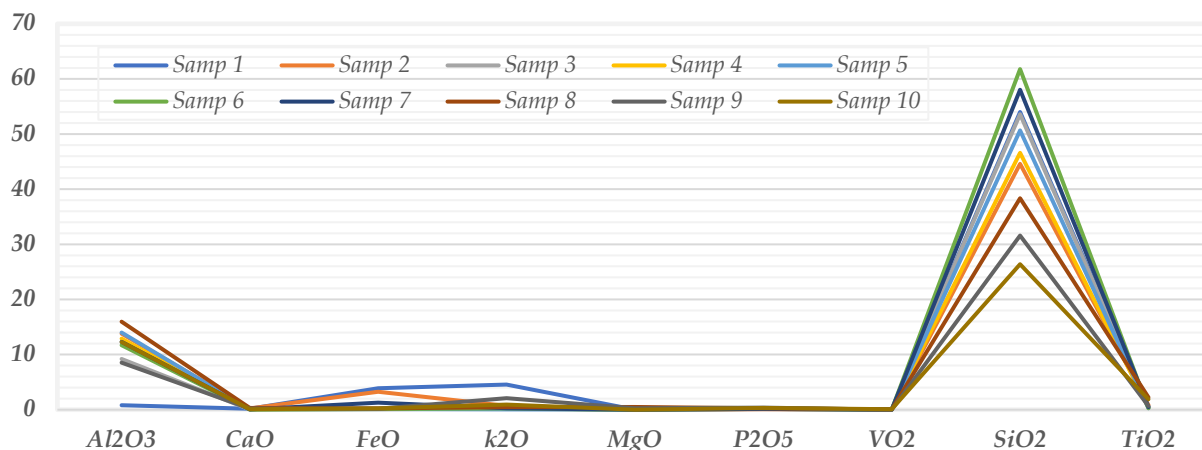


Fig. 11. Evolution of concentrations of major elements in alteration samples

#### Trace elements

Tab. 4 and Fig. 12 show a variation in Uranium concentrations in the various samples. There are highly mineralized alterations (Samp 9 and Samp 10), moderately mineralized alterations (Samp 5) and weakly or non-mineralized alterations. Vanadium is also present with

Uranium in the alteration profile. Zr levels reflect the abundance of Zircon in altered facies. A relatively low Th content is recorded. Other chemical elements, such as Copper (Samp 10), clearly indicate the phenomena and intensity of alteration.

Table 4

Trace element concentrations in alteration samples (ppm)

| Element | Samp1  | Samp2  | Samp3  | Samp4  | Samp5   | Samp6  | Samp7  | Samp8  | Samp9    | Samp10  |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|----------|---------|
| U       | 9.88   | 84.26  | 127.31 | 537.23 | 1061.35 | 372.60 | 471.63 | 452.49 | 13193.99 | 9013.36 |
| Zr      | 198.22 | 203.89 | 177.38 | 125.40 | 86.09   | 99.67  | 135.35 | 104.01 | 152.61   | 143.09  |
| Cu      | 21.13  | 31.14  | 0.00   | 0.00   | 7.32    | 0.00   | 0.00   | 107.88 | 60.06    | 1050.87 |
| V       | 30.21  | 115.71 | 55.78  | 111.92 | 138.85  | 55.99  | 77.49  | 469.80 | 136.15   | 463.78  |
| Th      | 10.78  | 12.59  | 20.73  | 23.47  | 18.92   | 18.91  | 22.04  | 0.00   | 0.00     | 6.25    |
| Cs      | 57.43  | 25.62  | 10.68  | 0.00   | 0.00    | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00     | 0.00    |

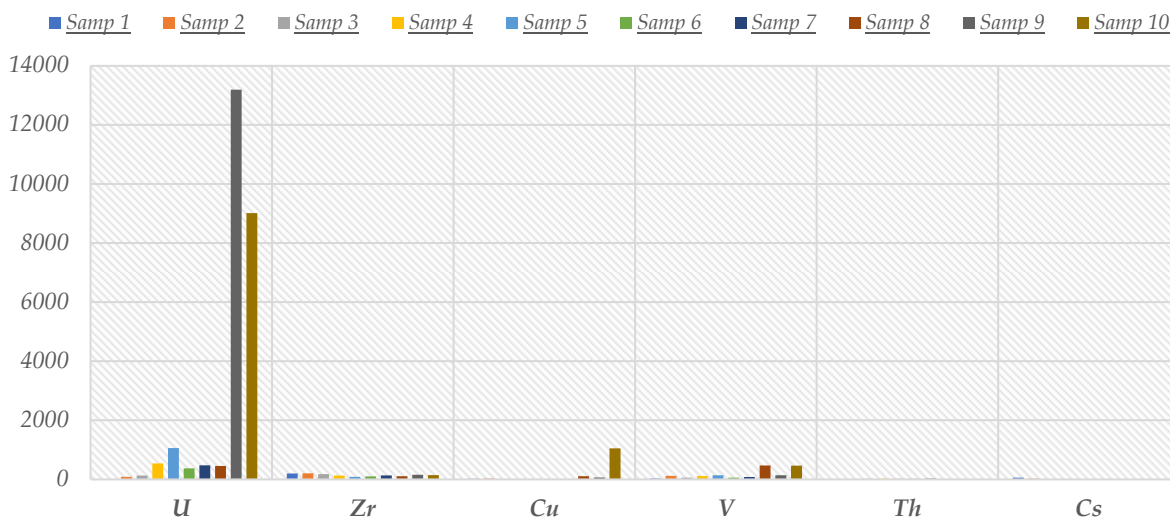


Fig. 12. Evolution of trace element concentrations in the alteration samples

Based on the analysis of samples from conglomeratic sandstones and altered facies we can conclude that three main chemical elements predominate in Tahaggart ore: silica, iron and aluminum; corresponding to sandstone and clay formations where iron is present at all levels with variable concentrations. It is richest in the conglomeratic sandstones, which are at the top of the series, compared with the altered rocks in the lower part. The other chemical elements, with varying grades in both facies, are generally

associated with typical uranium minerals and accessory minerals (quartz, rutile, zircon and monazite...) present in the Tahaggart ore. Uranium, the element of interest, is found in high concentrations in both facies. Uranium levels are higher in the alteration levels than in the conglomeratic sandstones.

#### Results

The results of analyses carried out on the various samples of Tahaggart uranium ores show the predominance of certain chemical elements over others. These elements

correspond perfectly to the chemical compositions of the dominant mineral phases observed under the optical microscope (petrographic study), namely: quartz, clays (kaolinite), iron oxides and hydroxides, uranium minerals and rutile. In summary, analysis of samples from conglomeratic sandstones and alteration facies shows that silica predominates over other Tahaggart ore components, with iron oxides and hydroxides more abundant in conglomeratic sandstones than in alteration facies. Clays are also present in alteration-related facies and to a lesser extent in conglomeratic sandstones, which appear as cement (matrix).

Carbonates, vanadates and phosphates and other chemical elements are present in small proportions in both facies and are generally bound to uranium and other minerals containing traces of uranium in their structures: carnotite, autunite, torbernite, metatorbernite (uranium minerals) and apatite, zircon, rutile and monazite (accessory minerals). Uranium grades in the Tahaggart deposit are significant, with 0.90 to 1.32 % in the mineralized altered levels and 0.34 and 0.74 % in the mineralized conglomeratic sandstones. Uranium is remarkably present in both facies, and is more concentrated in the altered levels. It is either associated with uranium-bearing minerals with high grades, or with lower grades in other minerals (apatite, zircon, rutile and monazite).

### Discussion and conclusions

The petrographic (macro and microscopic) mineralogical and geochemical characterization of the main ore horizons; represented by the conglomeratic sandstones, and the alteration facies of which they are composed after synthesizing the results and overall data from the Tahaggart deposit, revealed the following: uranium grades are high (0.90 to 1.32 % in the mineralized altered levels and 0.34 to 0.74 % in the mineralized conglomeratic sandstones).

The Tahaggart uranium ore contains mainly secondary uranium-bearing minerals of autunite and torbernite, associated with iron oxides (hematite and goethite) and a clay matrix (kaolinite). Significant thorium and rare-earth mineralization is enclosed in a reddish Ordovician conglomerate.

There are also other uranium-bearing secondary minerals such as carnotite, sabugalite and uranophane. Silica predominates over the other components of Tahaggart ore, confirming its sandstone character, with the presence of iron oxides and hydroxides, which are more abundant in conglomeratic sandstones than in alteration levels.

Clays are also present in alteration-related facies, and to a lesser extent in conglomeratic sandstones, where they act as cement (matrix). Carbonates, vanadates and phosphates, and other chemical elements, are present in small proportions in both facies, and are generally associated with uranium-bearing minerals, and other minerals containing traces of uranium in their structures.

### Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Laboratory of Draria Nuclear Research Center National in Algiers, as well as to the Laboratory for the Valorization of Mineral Resources and Environment LAVAMINE, at the University of Annaba, Algeria, for their support in carrying out this research study.

### References

Aissa, D. E., Boutaleb, A., Groucene, C., Amieur, M., & Cherfi, Y. (2022). Typologie et Hiérarchisation des Minéralisations de Terres Rares en Algérie. In *Third International Symposium on the Geology of the Maghrebides chain and adjacent areas-Setif University*, 3(6), 2022.

Allek, K., Hamoudi, M., Bouguern, A., & Boubaya, D. (2013). Integrating regional magnetic and radiometric airborne of asseo area, Hoggar, Algeria, using neural network analysis to the recognition of probable uranium

accumulation. In *9th EAGE International Scientific and Practical Conference and Exhibition on Engineering and Mining Geophysics* (pp. cp-346). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20142529>

Baadi, R. (2018). *Contribution à l'étude géologique et géophysique du gisement aurifère d'in Abeggui (Hoggar central-sud algérien)* (Doctoral dissertation). <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/17508>

Badahmaoui, T., Bugrieva, E. P., & Lavrukhin, A. A. (2020). Characteristics of uranium mineralization in the Tin-Séririne sedimentary basin (Algeria). *Journal of Physics: Conference Series*, 1689(1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012050>

Beuf, S., Bennacef, A., Biju-Duval, B., De Charpal, O., Gabriel, O., & Rognon, P. (1968). Les grands ensembles sédimentaires du Paléozoïque inférieur du Sahara. *C.R. Somm. Géol. Fr., Paris*, 8, 206. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=GEODEBRGM6911005363>

Bonhoure, J. (2010). *Géochimie des éléments de terres rares et du plomb dans les oxydes d'uranium naturels*. Éditions Universitaires Européennes. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752855>

Boni, M., Bouabdellah, M., Boukirou, W., Putzolu, F., & Mondillo, N. (2023). Vanadium ore resources of the African continent: State of the Art. *Ore Geology Reviews*, 157, 105423. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105423>

Bournas, N. (1998). *Etude structurale du bassin sédimentaire de Tin-Séririne (Hoggar) par les méthodes géophysiques*. Thèse de magister, USTHB Alger.

Carvalho, F. P., Fesenko, S., Harbottle, A. R., Lavrova, T., Mitchell, N. G., Payne, T. E., & Yankovich, T. L. (2023). *The environmental behaviour of uranium*. <https://apo.ansto.gov.au/handle/10238/15301>

Chahdane, R. (2009). *Contribution à l'étude géologique et géologique des minéralisations uranifères de Tahaggart (Sud-Est du Hoggar)*. Diss. Alger.

Claret & Tempère. (1968). Le paléozoïque du bassin de Tamsena (Sud de l'Ahaggar). *Z. Dtsch. Geol. Gesellsch. B.*, 117, 460–468.

Comena. (2002-2003). *Evaluation et extension des ressources uranifères de Tahaggart, Sud-Est du Hoggar*. Rapport 4: Résultats des travaux d'exploration des ressources uranifères de Tahaggart (Tassili Oua-N'-Ahaggar, Sud-Est du Hoggar). Rapport inédit.

CREM. (1986–1987). *Travaux de cartographie de la feuille Asséo*. Partie Nord - zone de Tahaggart.

CREM. (1991). *Levé géologique et recherche de minéralisations uranifères dans le bassin de Tin Séririne (Asséo)*. Rapport de synthèse. Inédit.

CREM. (1997). *Synthèse des travaux de prospection géologique et géophysique dans le bassin sédimentaires de Tin Séririne*. Tassili Oua N'Ahaggar, Sud-Est du Hoggar. Rapport inédit.

Descostes, M. (2017). *Géochimie des milieux naturels Anthrovisés* (Doctoral dissertation). Université de Poitiers.

Fabre, J. (1971). Structure de l'Algérie Saharienne. *Eléments pour une carte tectonique*. Pub. Serv. Géol. Algérie, 41, 161–185. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCALGEOD EBRGM7325239>

Frankland, V. L., Milodowski, A. E., & Read, D. (2020). Characterisation of meta-autunite: Towards identifying potential alteration products of spent nuclear fuel. *Applied Geochemistry*, 123, 104792. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104792>

Gherbi, R., & Becis, A. (2015). Fractional factorial design for studying uranium carbonate leaching of Tahaggart's ore. *International Journal of Mineral Processing*, 143, 59–64. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.09.001>

Grisson, S., & Souidi, M. (2020). Du métabolisme à l'épigénome: exemple d'étude multi-omique sur les effets des expositions à faibles doses d'uranium. *Environnement, Risques & Santé*, 19(5), 339–348.

Giry, Sabine. (2017). Marie Curie. Celle qui a pavé la voie aux femmes scientifiques. *Biofutur*, 36(385), 28.

Hallalouche, D. (1995). *Etude de l'altération du socle précambrien à la périphérie du bassin de Tin-Séririne (Hoggar-Sud, Algérie) et minéralisations Uranifères et Thorifères associées*. Thèse Doctorat. Université de Rennes I. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=167750>

Hatert, F., & Fabrice, D. B. (2018). Les minéraux d'uranium. *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, 87. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/245864/1/Min%C3%A9raux%20radioactifs-SRSL-2018.pdf>

Jarc, S. (2022). Statistical approach to interpretation of geochemical data of stream sediment in Pleše mining area. *Geologija*, 65(2), 225–235. <https://doi.org/10.5474/geologija.2022.013>

Joulié, F. (1959). Les séries primaires au Nord et au Nord-Ouest de l'Aïr (Sahar central), Discordances observées. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), 1, 192–193. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-I.2.192>

Joulié, F. (1959). Précisions sur la discordance cambro-ordovicienne d'In Azaoua (Niger). *C.R. Somm. Soc. Géol. Fr.*, 177–178.

Khalidi, A. (2005). La stratigraphie séquentielle du Paléozoïque de la bordure méridionale du Hoggar (Région de Tin Séririne, Tass Oua N'Ahaggar), Application à l'exploration minière. *Sémi. Géol. Métal. Massifs du Hoaggar et Eglabes*. p.81

Khalidi, A., & Mokhtar, S. A. (2018). Application of UNFC to Uranium Resources Discovered in Algeria. (No. IAEA-CN–261). [https://media.superevent.com/documents/20180619/7f1e92530adbebe885974f54190f6ef/cn\\_261-uram2018-book-of-abstracts.pdf](https://media.superevent.com/documents/20180619/7f1e92530adbebe885974f54190f6ef/cn_261-uram2018-book-of-abstracts.pdf)



Lessard. (1961). Les séries primaires des tassilis Oua-N-Ahaggar, au Sud du Hoggar entre l'Aïr et l'Adrar des Iforas (Sahara méridional). *Bull. Soc. Géol. Fr., Paris*, 7(t.III), 501–513. <https://doi.org/10.2113/gssgfbull.S7-III.5.501>

Lourenco, J., Mendo, S., & Pereira, R. (2016). Radioactively contaminated areas: Bioindicator species and biomarkers of effect in an early warning scheme for a preliminary risk assessment. *Journal of Hazardous Materials*, 317, 503–542. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.06.020>

Mokaddem, M. (1980). Le bassin sédimentaire de Tin-Séririne et ses minéralisations uranifères (Hoggar-ALGERIE). *Thèse Doct 3ème Sci.*, 9(3/4), 401–412. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6523539>

Nelson, A., Getley, S., & Spalding, D. (2019). *Assessment of Technology for Additive Manufacturing of Ceramic Nuclear Fuels*. ORNL, 1311. <https://trc.ornl.gov/wp-content/uploads/2021/07/M3CT-19OR06090131-Final.pdf>

Rabia-Zaourar, C. (1978). *Fragmentation, classification et enrichissement des minerais d'uranium de Tahaggart* (Doctoral dissertation, Alger).

Reed, B. C. (2020). *Manhattan project: The story of the century*. Springer Nature. <http://doi.org/1007/978-3-030-45734-1>

Rentetzi, M. (2022). *Seduced by radium: how industry transformed science in the American marketplace*. University of Pittsburgh Press.

Sanguinetti, H., Nedjari, N., Aouami, I., Din, C., Cazoulat, M., Tiemogo, M., & Christophe, C. C. (2018). Recherches de minéralisation d'uranium dans le bassin de Tim Mersoï (république du Niger), Une revue des guides de prospection. *Mémoire du Service Géologique de l'Algérie*, 20, 3–27.

Sminov, A. L., Rychkov, V. N., Titova, S. M., Poponin, N. A., & Nalivayko, K. A. (2018). Precipitation of uranium from nitrate-sulfuric eluates by aqueous ammonia solution. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 317, 863–869. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5942-x>

SONAREM. (1977). *Inventaire et prospective des ressources minérales du Hoggar*. Division recherches. Alger.

Syczewski, M. D., Siuda, R., & Parafiniuk, J. (2023). Concentrations in Secondary Uranium Minerals from the Izera Metamorphic Complex (SW Poland). *Minerals*, 13(7), 945. <https://doi.org/10.3390/min13070945>

Zerbib, J. C. (2024). La corrosion des gaines d'éléments combustibles en Zircaloy—Global Chance.

Отримано редакцією журналу / Received: 14.03.25  
Прорецензовано / Revised: 27.03.25  
Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Зохір МЕКТИ<sup>1</sup>, д-р гірничої інженерії  
ORCID ID: 0000-0002-6153-7026  
e-mail: zohir.mekti@univ-annaba.dz

Асія БУТЕМЕДЖЕТ<sup>1</sup>, д-р гірничої інженерії  
ORCID ID: 0009-0007-4644-3914  
e-mail: Assia.boutemedjet@univ-annaba.dz

Туркія ТАХРІ<sup>2</sup>, д-р гірничої інженерії  
ORCID ID: 0000-0002-3953-9914  
e-mail: tourkia.tahri@univ-bejaia.dz

Айсса БЕНСЕЛЬГУБ<sup>3,4,5</sup>, д-р філософії з екології та охорони навколишнього середовища  
ORCID ID: 0000-0001-5891-2860  
e-mail: benselhoub@yahoo.fr

Абдельмохсен М. СОЛІМАН<sup>6</sup>, ст. наук. співроб.  
e-mail: amsolimannrc@gmail.com

Стефано БЕЛЛУЧЧІ<sup>5,7</sup>, ст. наук. співроб.  
ORCID ID: 0000-0003-0326-6368  
e-mail: bellucci@lnf.infn.it

<sup>1</sup>Лабораторія валоризації гірничих ресурсів і навколишнього середовища, гірничий факультет, Університет Баджі Мохтара, Аннаба, Алжир

<sup>2</sup>Університет Абдерахман Міра, технологічний факультет, лабораторія технології матеріалів та інженерних процесів (LTMGP), Беджая, Алжир

<sup>3</sup>Віденський університет, Відень, Австрія

<sup>4</sup>Центр екологічних досліджень (C.R.E), Аннаба, Алжир

<sup>5</sup>INFN-Національні лабораторії Фраскати, Фраскати, Італія

<sup>6</sup>Кафедра терапевтичної хімії, Національний дослідницький центр Єгипту, Каїр, Єгипет

<sup>7</sup>Національний інститут фізики матеріалів, Бухарест, Румунія

## ПЕТРОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА УРАНОВОЇ РУДИ ТАХАГГАРТ (ЕЛЬ-ХОГГАР, ПІВДЕННИЙ АЛЖИР)

**В с т у п .** Алжир давно намагався розробити свої родовища урану в регіоні Хоггар, метою є збут руди, використання частини продукції виключно в цивільній сфері, зокрема для виробництва електроенергії. Експлуатація та валоризація цієї руди вимагають дуже специфічного процесу розробки, характеристики та обробки. Основною метою цієї роботи є створення детальної та повної технічної таблиці для родовища Тахаггарт, що дасть змогу реалізувати технологію видобутку та збагачення уранової руди для отримання товарного продукту, відомого як "yellow cake".

**М е т о д и .** Для досягнення цієї мети було взято зразки з досліджуваної ділянки з подальшим мікроскопічним і макроскопічним аналізом нетонких зрізів для отримання петрографічної, мінералогічної та геохімічної ідентифікації.

**Р е з у л ь т а т и .** Аналіз підтвердив пісковиковий характер руди та переважання кварцу, глини, оксидів та гідроксидів заліза, а також мінералів урану та рутилу. Вміст урану в мінералізованих змінених рівнях коливається від 0,90 до 1,32 % і від 0,34 до 0,74 % в мінералізованих конгломератичних пісковицях. Уран трапляється або у високоякісних уранових мінералах, або в низькоякісних апатитах, цирконі, рутилі та в слідах у монациті.

**В и с н о в к и .** Різні дослідження, проведені в регіоні Тахаггарт; довели наявність уранових руд у значних кількостях, коливаючись від 0,90 до 1,32 % у мінералізованих змінених рівнях і від 0,34 до 0,74 % у мінералізованих конгломератичних пісковицях, однак, незважаючи на це та враховуючи стратегічне значення, яке уран має на міжнародному рівні; на сьогодні державна експлуатація цієї шахти не ведеться. Кращим методом очищення в цьому випадку є купкове вилуговування; коефіцієнт вилучення за допомогою цього методу може досягати 70 % урану у вигляді "yellow cake".

**К л ю ч о в і с л о в а :** уран, Тахаггарт, петрографічна характеристика, мінералогія та геохімія, вилуговування, "yellow cake".

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

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

## ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.10>

Микола БУРЛУЦЬКИЙ, канд. геол. наук

ORCID ID: 0009-0000-6718-3006

e-mail: [Nikolay2205@i.ua](mailto:Nikolay2205@i.ua)

Державна служба геології та надр України, Київ, Україна

Станіслав ЛИТВИНЮК, канд. геол. наук

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: [lytvyniuksf@gmail.com](mailto:lytvyniuksf@gmail.com)

Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна

ГЕНЕЗІС ТА ГЕОХІМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ  
РІДКІСНОМЕТАЛІЧНОГО ЗРУДЕННЯ У БУРОМУ ВУГІЛЛІ ЗАКАРПАТТЯ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. В.М. Загнітком)

**Вступ.** 17 січня 2025 року набув чинності Закон України № 4154-ІХ, який регулює оновлення Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року та надає визначення стосовно корисних копалин та компонентів стратегічного та критичного значення. З врахуванням законодавчих змін у сфері геологічного вивчення та надрокористування, сучасні дослідження спрямовані у тому числі на вивчення комплексного освоєння вугільних родовищ із вилученням супутніх корисних копалин та компонентів. Зокрема, розглядаються можливості видобутку рідкоземельних та інших цінних компонентів із бурого вугілля та відходів його використання у закарпатському регіоні України.

**Методи.** Методика досліджень генезису рідкіснометалічного зрудення зосереджена на сучасних аналітичних методах, таких як мас-спектрометрія з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS). Широко використовувалося моделювання процесів, що описують поведінку рідкісних і рідкоземельних металів під час вулканотворення та вплив різних факторів на їхній розподіл. Проведено оцінку потенціалу видобутку цих металів з бурого вугілля як додаткового джерела цінних елементів.

**Результати.** За результатами досліджень встановлено, що кількісні та якісні відмінності у складі мікроелементів визначаються специфікою вулканічної та гідротермальної діяльності у різних районах Закарпаття, а також особливостями палеогеографічних умов формування окремих буровугільних родовищ.

Дослідження форм накопичення мікроелементів у вугіллі має важливе значення не тільки для вирішення деяких генетичних питань, але і дає змогу оцінити перспективність вугілля на той чи інший промислово цінний елемент. Завдяки використанню методів математичної статистики, зокрема коефіцієнтів рангової кореляції, вдалося спрогнозувати коло елементів, накопичення яких відбувається синхронно, що відкриває нові перспективи у комплексному використанні закарпатського вугілля. Зіставлення вмістів мікроелементів у вугіллі з кларками в земній корі переконливо свідчать про виняткову роль органічної речовини в концентруванні рідкісних і рідкоземельних елементів.

**Висновки.** Отримані результати свідчать про те, що буровугільні пласти Закарпаття збагачуються рідкісними та рідкоземельними металами, такими як германій, індій, галій, стронцій, скандій, ітрій, ітербій, лантан, під впливом кількох факторів: 1) гідротермальні процеси: Закарпаття має активну геотектонічну історію, яка сприяла циркуляції гідротермальних розчинів через осадові породи, що привело до їх збагачення рідкісними та рідкоземельними металами; 2) постосадові зміни: органічна речовина бурого вугілля може поглинати і накопичувати метали під час діагенезу та катагенезу; 3) вмісні породи: присутність вулканогенних порід у регіоні є додатковим джерелом, зокрема і рідкісних та рідкоземельних металів.

Розуміння генезису та геохімічних особливостей рідкіснометалічного зрудення у бурому вугіллі Закарпаття є ключовим для ефективного використання цих ресурсів.

Подальші дослідження в цій галузі сприятимуть розробці нових методів видобутку та переробки, а також глибшому розумінню геологічних процесів, що приводять до формування таких унікальних покладів. Комплексний підхід, що включає геохімічний, мінералогічний, екологічний та економічний аналізи, дозволить не лише зрозуміти механізми зрудення, але й оцінити перспективи використання цих ресурсів у майбутньому.

**Ключові слова:** критична мінеральна сировина, германій, буровугільні родовища, рідкоземельні та рідкісні метали.

**Вступ**

Критерієм ефективності та оптимальності використання мінеральних ресурсів можна вважати максимальне задоволення потреб суспільства в конкретних видах сировини при визначених затратах та за умови дотримання екологічних нормативів. Водночас мають враховуватись чинники економічного, екологічного та соціального характеру, як-от: задоволення поточних і перспективних потреб у конкретному ресурсі, рівень поточних витрат при виробництві й споживанні продукту; порівняльний економічний ефект, отримуваний за різних варіантів використання надр; тенденції науково-технічного прогресу в освоєнні й використанні ресурсів надр; проведення заходів щодо збереження ресурсів для майбутніх поколінь; мінімізація шкідливих впливів гірничого виробництва на довкілля тощо. Розв'язання проблеми раціонального використання мінерально-сировинних ресурсів потребує подальшого вдосконалення техніки і технології видобування, переробки і споживання ресурсів

при оптимальному поєднанні адміністративних, правових та екологічних заходів (Сивий М. та ін., 2013).

У 2025 р. вносяться певні зміни до законодавства, зокрема набув чинності Закон України № 4154-ІХ "Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо оновлення Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року та регулювання деяких питань стосовно корисних копалин та компонентів стратегічного та критичного значення" (далі – Закон). Закон актуалізує програму розвитку мінерально-сировинної бази України, затверджену понад 10 років тому – ще у 2011 р. Також Закон передбачає внесення змін до Кодексу України про надра в частині корисних копалин, які мають стратегічне і критичне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави.

У програмі більше уваги приділено стратегічним і критичним мінеральним ресурсам, таким як рідкісноземельні елементи (приріст ресурсів до 338,6 тис. т), зокрема

такі стратегічні корисні копалини, як літій, ніобій, германій та інші елементи.

Це свідчить про зміну пріоритетів у бік стратегічно важливих матеріалів, необхідних для високотехнологічних галузей (зокрема, електроніки, акумуляторів, оборонної промисловості).

Наша країна вже уклала низку меморандумів про взаєморозуміння між Європейським Союзом та Україною щодо стратегічного партнерства у сфері мінеральної сировини, а також меморандум про взаєморозуміння між урядами України та Сполучених Штатів Америки щодо співробітництва для того, щоб посилити ланцюги постачання в секторі критичних мінеральних ресурсів для енергетики, національної безпеки та економічного розвитку. Слід зазначити, що Україна на цей час має 22 з 50 стратегічних матеріалів, визначених США як критично важливі, а також 24 з-поміж 34, визнаних критичними у ЄС (Баряцька, 2020).

Видобуток германію та рідкісних і рідкоземельних елементів (РЗЕ) з вугілля, зокрема і з бурого, є перспективним напрямом у сучасній геології та видобувній промисловості. Різні країни світу розробляють та впроваджують технології для ефективного вилучення цих цінних компонентів. Розробка новітніх технологій для видобутку германію та рідкісних і рідкоземельних елементів з вугілля, зокрема бурого, є актуальною темою в таких країнах, як США, Німеччина та Китай.

Американські дослідники активно працюють над методами вилучення рідкісних елементів з вугільних відходів. Зокрема розглядаються процеси термічного горіння відходів вуглевидобутку з подальшим вилученням цінних компонентів. Розроблено класифікацію відходів вуглевидобутку за їх небезпекою та потенціалом для вторинного використання.

У Німеччині також досліджують інноваційні підходи до використання відходів вуглевидобутку, зокрема розглядаються технології, спрямовані на вилучення рідкісних елементів з відходів, що утворюються під час видобутку та переробки вугілля. Так, у Нижньорейнському басейні проводяться дослідження щодо вилучення германію з бурого вугілля. Технології включають пірометалургійні та гідрометалургійні методи, які дадуть змогу отримувати германій з відходів вугільної промисловості. Завдяки цьому можна не лише зменшити екологічний вплив відходів, але й отримати додаткові джерела цінних матеріалів.

Китай є провідним виробником германію у світі. Країна активно розвиває технології вилучення германію з вугілля та його відходів. Зокрема, досліджуються методи вилучення германію з бурого вугілля, яке є перспективним джерелом цього елементу. За прогнозами до 2030 р. попит на германій становитиме 320–400 т на рік, що стимулює розвиток відповідних технологій.

Таким чином, у США, Німеччині та Китаї активно розробляють та впроваджують новітні технології для видобутку германію та рідкісних елементів з вугілля та його відходів, що сприяє ефективному використанню ресурсів та зменшенню екологічного навантаження.

В Україні також проводять дослідження щодо вилучення рідкісних та рідкоземельних елементів з вугілля та його відходів, зокрема в Інституті геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України аналізується досвід використання попереднього збагачення залізних руд, що може бути застосовано і для вугілля.

Для пошуку, розвідки та видобутку германію, рідкісних і рідкоземельних елементів з вугілля, зокрема бурого, а також розробки новітніх технологій щодо вилучення цих цінних компонентів не останню роль відіграють питання

щодо вивчення генезису та геохімічних особливостей рідкіснометалічного зруденіння у бурому вугіллі.

**Метою роботи** є визначення генезису рідкіснометалічного зруденіння, встановлення її просторової локалізації, аналізу впливу вулканічних та гідротермальних процесів на формування бурого вугілля та рідкіснометалічної мінералізації в ньому, що є вкрай важливим для визначення методів пошуку та розвідки рідкісних та рідкоземельних металів, а також, у подальшому, використання методів та новітніх технологій вилучення зазначених цінних компонентів з бурого вугілля Закарпаття. Варто зазначити, що рідкіснометалічне зруденіння у бурому вугіллі є важливим об'єктом досліджень через його економічне значення та унікальні геохімічні характеристики.

Асоціація германію з рідкісними та рідкоземельними елементами у родовищах такого геолого-промислового типу може підвищити їх економічну цінність та комплексність використання родовищ бурого вугілля.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Питання умов утворення родовищ бурого вугілля Закарпаття, генезису рідкіснометалічного зруденіння, аналізу впливу вулканічних і гідротермальних процесів на формування бурого вугілля та рідкіснометалічної мінералізації в ньому, а також проблеми вилучення германію, інших рідкісних та рідкоземельних металів вивчала низка вітчизняних і закордонних дослідників.

Питання щодо рідкіснометалічного зруденіння в осадових басейнах України, а також геохімії рідкісних елементів у вугіллі Закарпаття вивчали вітчизняні науковці: Гончарук О.В. (Гончарук, 2017); Іваненко П.І. (Іваненко, 2018); Сидоренко М.Г. (Сидоренко, 2019); Петров В.С. (Петров та ін., 2020). Проблеми вилучення цінних компонентів з вугілля, в тому числі і германія, та використання їх як критичної сировини досліджувалися у працях вітчизняних фахівців (Бучинська І.В. та ін., 2023); (Блайда І.А. та ін., 2011); (Булат А.Ф., та ін., 2021).

Вивченню питання генезису та геохімічних особливостей рідкіснометалічного зруденіння у бурому вугіллі присвячені й роботи закордонних авторів: Smith J.A. (Smith, J.A., et al., 2015); Müller C. (Müller C. et al., 2017); Wang, P. (Wang et al., 2019); Zhao, C (Zhao et al., 2021).

Основні висновки попередніх досліджень:

- у бурому вугіллі Закарпаття зафіксовано аномально високі концентрації германію, галію, лантану, ітрію, індію та інших рідкісних та рідкоземельних елементів;
- генезис рідкіснометалічного збагачення бурого вугілля може бути пов'язаний із вулканічною та гідротермальною активністю;
- дослідження геохімії бурого вугілля свідчать про суттєвий вплив локальних тектонічних структур.

Попри значний внесок вищезазначених досліджень, залишається відкритим питання про точні механізми формування рідкіснометалічних аномалій, їхній взаємозв'язок із стратиграфією вугілля та можливі шляхи подальшого використання таких родовищ. Це підкреслює необхідність нових геохімічних і мінералогічних досліджень із використанням сучасних методів аналізу для вирішення вказаних завдань.

#### Методи

Дослідження рідкісних, розсіяних і кольорових металів у бурому вугіллі Закарпаття у 1960–1980 рр. здійснювали різні структурні підрозділи колишнього Міністерства геології УРСР. За період польових робіт, проведених Закарпатською геологорозвідувальною партією Інституту мінеральних ресурсів (Смирнов та ін., 1966), було відібрано і проаналізовано понад 3000 проб вугілля



і вуглевмісних осадових і вулканогенних порід. Переважну кількість проб відібрано з кернавого матеріалу родовищ Бегань, Березинка, Рокосово, Новоселиця, Крива, а також у гірничих виробках родовища Ільниця (шахта № 33) та Горбки (шахта № 29-біс).

З вуглевмісних відкладів відбиралися зразки, що характеризують мікроскопічно відмінні літологічні різновиди, у разі великої потужності монотонного буровугільного пласта – відбиралася серія проб з інтервалом 1–2 м. У вугільних пластах, за можливості, випробувалися підшва, середина і покрівля пласта. Всі відібрані проби спрямовувалися до спектральної лабораторії КДУ ім. Шевченка. Напівкількісний спектральний аналіз проводився на 32 елементи.

Кількісні хімічні визначення германію, молібдену, берилію, літію, галію, інших рідкісних та рідкоземельних металів виконано в аналітичних лабораторіях Інституту мінеральних ресурсів (м. Сімферополь) та дослідного заводу Інституту загальної неорганічної хімії (м. Одеса).

Випробувальні роботи з вивчення германієносності бурого вугілля Закарпатська геологорозвідувальна експедиція розпочала на початку 1957 р. і проводила паралельно з пошуково-розвідувальними роботами на вугіллі. У 1960 р. Київський геологорозвідувальний трест склав звіт "Про результати пошуково-випробувальних робіт на германій", виконаних Закарпатською геологорозвідувальною експедицією на території Станіславської та Закарпатської областей УРСР протягом 1958–1959 рр. У звіті наведено результати по 2300 пробах спектрального аналізу та 100 пробах вугілля та порід, що вміщують вугілля. Водночас надаються відомості про спектрографічне визначення рідкісних та розсіяних елементів, зокрема берилію, галію, скандію, ітрію, ітербію, лантану, що трапляються в золі вугілля та вмісних породах. У журналах спектральних аналізів звіту подано деталізацію щодо 25 хімічних елементів. Таку кількість вибрано не випадково, адже відповідно до чинних на той час "Тимчасових вказівок щодо випробування і підрахунку запасів германію та інших рідкісних елементів у родовищах вугілля" всі проби потрібно було піддавати напівкількісному спектральному аналізу з обов'язковою деталізацією по 30 хімічних елементах.

Варто зазначити, що автори цієї статті у 2024 р. відібрали проби на родовищі лігнітів в Ільниці, що єдине нині працює у Закарпатті. Дослідження здійснено за МВВ 081-0665-09 у Центральній лабораторії ДП "Українська геологічна компанія" та лабораторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. При цьому підвищені вмісти на зазначеному родовищі лігнітів відмічено по таких хімічних елементах як Ti, Mo, V, Sr.

### Результати

В Україні розвідані поклади бурого вугілля зосереджені у Дніпровському буровугільному басейні та трьох вугленосних площах: Придністровській, Прикарпатській і Закарпатській. Також відомі відокремлені родовища у Дніпровсько-Донецькій западині.

На сьогодні загальний обсяг розвіданих запасів бурого вугілля перевищує 8,5 млрд т, з них балансові запаси становлять 2 932,5 млн т, прогнозні – 5 081,8 млн т.

Україна має напрацьовані технології та значний досвід видобування бурого вугілля як відкритим, так і підземним способом. В окремі роки його в країні добували до 12 млн т. Починаючи з 1990 р. видобуток скорочувався швидкими темпами і нині фактично призупинений. Незначний обсяг вугілля (200...300 тис. т/рік) видобували до останнього часу лише на окремих родовищах Олександрійського геолого-промислового району.

Причинами зниження обсягів видобутку є передусім недостатні інвестиції в галузь, фізичне старіння обладнання та відсутність електростанцій, які працюють на буровугільній сировині. У той же час ціна бурого вугілля майже у 2,5 раза нижча за ціну еквівалентного за теплоємністю обсягу нафти та у 1,3 раза – газу.

**Буре вугілля, напрями використання, джерело отримання рідкісних та рідкоземельних металів.** Доцільність використання бурого вугілля в тепловій енергетиці на цей час підтверджується екологічною чистотою, яку забезпечують сучасні технології виробництва енергії з бурого вугілля.

До недавнього часу (2010–2013 рр.) отримання електроенергії з буровугільної сировини становило у Чехії – 63 %, Польщі – 42 %, Німеччині – 27 %. Починаючи з 2000 р. в Німеччині електрична енергія з цього виду палива стала найдешевшою і навіть конкурувала з атомною електроенергією.

Дослідження використання бурого вугілля в Україні показали доцільність збільшення його видобутку в країні переважно для виробництва електроенергії, паливних брикетів, гірського воску, вуглелужних реагентів, сорбентів і гумінових препаратів.

До останнього основним напрямом використання бурого вугілля в Україні було виробництво брикетів і використання їх як побутового палива. Основним споживачем брикетів є сільське населення України. Частину вугілля направляли на ТЕЦ для виробництва технологічної пари й попутно – електроенергії. Водночас важливо враховувати небезпечні геологічні процеси (Vyzhva et al., 2010). Незначну частину використовували для вилучення бітуму й виробництва вуглелужних реагентів на Семенівському заводі гірського воску. До 2003 р. вугілля й брикети поставлялись на Ладижинську теплоелектростанцію, нині поставки призупинені.

У бурому вугіллі Олександрійського гірничопромислового району встановлено підвищений вміст германію (2,5...5,0 г/т). Постійно присутні також підвищені концентрації рідкоземельних елементів (лантан – до 40 г/т, ітрій – до 10 г/т, ітербій – до 20 г/т, церій – до 40 г/т), що свідчить про рідкоземельну спеціалізацію вугілля родовищ.

Науковці Одеського відділу інженерної академії України запропонували плазмохімічну технологію отримання синтетичного рідкого палива з бурого вугілля. Собівартість такого палива нижча, ніж отриманого з нафтової сировини. Водночас моторні палива (бензин, дизельне паливо), отримані з бурого вугілля, за фізико-хімічними властивостями аналогічні, отриманим з нафти, і спалювання їх у двигунах внутрішнього згоряння не потребує їхньої модифікації. Плазмохімічна технологія переробки вуглеводневої сировини за сукупністю параметрів не має світових аналогів. Основні технологічні процеси нової технології досліджені й випробувані на пілотних установках. Запаси бурого вугілля, потужності вугледобувних шахт і розрізів, підприємств з первинної переробки вугілля дозволяють на цій сировинній і виробничій базі організувати виготовлення синтетичного рідкого палива обсягом 5 млн т/рік з перспективою поетапного нарощування видобутку вугілля й виробництва палива.

Що стосується накопичення рідкісних та рідкоземельних елементів у вугіллі. М.В. Гольдшмідт та К. Петерс (Гольдшмідт, 1938) вперше намітили шляхи, що ведуть до концентрування мікроелементів у вугіллі:

1. Накопичення під час життєдіяльності рослин. Таке накопичення дуже характерне для бору – мікроелемента, що відіграє значну роль у житті багатьох рослин.

2. Накопичення під час зітлювання та розкладання рослинного матеріалу: Після відмирання рослин

відбувається вимивання легкорозчинних неорганічних частин, у зв'язку з чим накопичуються (відносно загальної кількості неорганічної речовини) складніші розчинні компоненти. Таким шляхом можливе концентрування берилію, ітрію, інших рідкісноземельних елементів.

3. Накопичення після поховання пластів рослинної речовини, що вуглефікується, пов'язане з впливом підземних вод, що містять рідкісні елементи (епігенетичне накопичення).

Сьогодні велике значення надається можливому концентруванню рідкісних і розсіяних елементів у торф'яно-болотну стадію, причому, судячи з експериментальних даних та спостережень над природними об'єктами, цей процес відіграє вирішальну роль у сингенетичному накопиченні мікроелементів.

Цілком природно, що в процесі розвитку басейну вуглеводородної хімії елементи привносяться розчинами і осаджуються органічною речовиною як у торф'яному болоті, так і вже сформованому пласті, і тому рідкісне протиставлення сингенетичності та епігенетичності зрудинення у вугіллі не було правомірним. Можна говорити про переважну роль того чи іншого. Так, під час вивчення третинного бурого вугілля Карловарського родовища встановили, що найбільш високі вмісти берилію зумовлені сорбцією цього елемента з циркулюючих ґрунтових вод вугільного пласта та зони порушень у прилеглих гранітах, що служать джерелом цього рідкісного елемента.

На ділянках, де вугільні пласти залягають у водонепроникних породах, вміст берилію на один-два порядки нижчий. Звідси випливає цілком обґрунтований висновок про епігенетичне накопичення берилію в карловарському вугіллі: Інший приклад – розподіл берилію на одному з американських вугільних родовищ.

Американські дослідники вказують, що в цьому разі мало місце сингенетичне накопичення берилію або завдяки прижиттєвій акумуляції цього елемента рослинами-торфоутворювачами, або шляхом адсорбції з розчинів у торфо-болотну стадію.

Наведений приклад яскраво показує, що накопичення навіть одного й того ж елемента залежно від геологічних умов у районі може відбуватися різними шляхами. Однак поза залежністю від переважної ролі того чи іншого способу накопичення існує низка умов, що визначають саму можливість досягнення надзвичайно високих вмістів мікроелементів у вугіллі. Такими загальними факторами є:

1. Висока сорбційна активність рослинної речовини, що вуглефікується, та бурого вугілля.

2. Міграція мікроелементів у розчиненому стані.

3. Наявність досить потужного джерела рідкісних та розсіяних елементів у безпосередній близькості від басейну вуглеводородного накопичення.

Встановлено, що реакційна здатність вугілля, отже і його сорбційні можливості, падають зі збільшенням ступеня вуглефікації.

**Родовища бурого вугілля Закарпаття.** Закарпаття характеризується складною геологічною будовою, що зумовлює різноманітність корисних копалин, включаючи буре вугілля, різні види будівельних матеріалів, ртуть, алуніт, рідкісні та рідкоземельні метали.

У Закарпатському вугленосному районі відомо понад 20 невеликих родовищ і проявів бурого вугілля і лігнітів, приурочених до неогенових відкладів у Чоп-Мукачівській та Солотвинській западинах.

У Державному балансі запасів враховано три родовища бурого вугілля (Ільницьке, Лохівське і Кривське) та одне родовище германієвих лігнітів (Біганське).

Загальні запаси бурого вугілля й лігнітів становлять понад 39 млн т. Вміст германію у лігнітах Біганського

родовища сягає у середньому 182 г/т. Це єдине в Україні розвідане родовище цього цінного для промисловості напівпровідників хімічного елемента. З родовищ бурого вугілля розробляється лише Ільницьке, на якому відкритим способом ведеться видобуток сировини. Запаси родовища перевищують 27 млн т (Сивий М. та ін., 2013).

Основна частина Закарпатської вугленосної площі розташована на території Ужгородського, Мукачівського, Хустського та Берегівського районів. Усі родовища та прояви вугілля в Закарпатті пов'язані з відкладами неогенового віку. Відклади неогену залягають з кутовим та стратиграфічним неузгодженням на утвореннях палеозою, мезозою та палеогену.

Свого часу видобуток бурого вугілля здійснювали невеликі штольні з максимальною добовою продуктивністю 40–50 т у районі селищ Ільниця, Вилок, Крива, Шаян.

За своїм стратиграфічним положенням вугленосні відклади Закарпатської площі можна розділити на чотири групи: 1) вугленосні відклади тортонського віку; 2) вугленосні відклади середнього сармату; 3) вугленосні відклади паннона; 4) вугленосні відклади левантіна.

Протяжність площі до 100 км за ширини 10 км. Кількість промислових пластів змінюється від 1 до 5. Потужність їх змінюється від 0,7–1,0 м до 5–7 м і становлять здебільшого 1–2 м. Глибина залягання промислових пластів змінюється в широких межах – від кількох метрів до 200–300 м. Іноді пласти вугілля виходять на поверхню.

**Генезис рідкіснометалічного зрудинення в бурому вугіллі Закарпаття.** Як вже зазначалося вище, дослідження рідкісних, розсіяних і кольорових металів у бурому вугіллі Закарпаття, їх генезису, а також можливого впливу на їх кількісний і якісний склад вулканічної та поствулканічної діяльності, що широко проявилися в неогеновий час, проводили різні структурні підрозділи (геологічні партії, експедиції) колишнього Міністерства геології УРСР (Смирнов і др., 1966); (Левицький, 1960).

Поширеність мікроелементів досліджували не тільки в бурому вугіллі (лігнітах), а й у вуглевмісних породах, що дало змогу виявити комплекс мікроелементів, які концентруються в закарпатському бурому вугіллі.

Варто зазначити, що правильне ув'язування процесів накопичення вугленосно-осадових товщ і вулканізму неможливе без чітких уявлень про стратиграфію, тектоніку і магматизм.

Питання визначення генезису рідкіснометалічного зрудинення потребує вивчення палеогеографічних умов у період формування вугленосних відкладів, встановлення областей зносу та характеру вивітрювання порід, що розмиваються.

Кількісні та якісні відмінності у складі мікроелементів, як встановлено в результаті проведених досліджень, визначаються специфікою вулканічної та гідротермальної діяльності у різних районах Закарпаття, а також особливостями палеогеографічних умов формування окремих буровугільних родовищ.

Завдяки використанню методів математичної статистики, зокрема коефіцієнтів рангової кореляції, вдалося намітити коло елементів, накопичення яких відбувається синхронно, що відкриває нові перспективи у комплексному використанні закарпатського вугілля.

Зіставлення вмісту мікроелементів у вугіллі з кларками в земній корі переконливо свідчать про виняткову роль органічної речовини в концентруванні рідкісних і розсіяних елементів.

Відомі в Закарпатті вугільні родовища зазвичай невеликі за розмірами і здебільшого представлені бурим вугіллям з початковим ступенем обвуглювання, тому використання їх для енергетичних цілей не завжди буває

видним. Тим часом у вугіллі деяких закарпатських родовищ встановлено підвищені вмісти рідкісних, розсіяних та рідкоземельних елементів, причому концентрація деяких з них становить промисловий інтерес.

Якщо врахувати, що утворення переважної більшості родовищ та вуглепроявлень Закарпаття відбувалось одночасно з активною вулканічною діяльністю, то стає зрозумілим необхідність і актуальність зв'язку між вулканізмом і накопиченням у бурому вугіллі зазначених елементів. У загальному вигляді цю проблему поставив Перельман О.К. (Перельман, 1964), що намітив наступний ланцюг явищ: вулканізм і надходження вуглекислого газу в атмосферу, посилення фотосинтезу і біологічного кругообігу атомів – формування потужної кислої кори вивітрювання і винесення з неї рухомих елементів – вуглеутворення в болотах і накопичення у вугіллі рідкісних елементів, вилужених з кори вивітрювання.

Виявлення закономірностей накопичення мікроелементів в органічних утвореннях під час вулканічної діяльності дозволить цілеспрямовано вести пошуки родовищ бурого вугілля (лігнітів) із підвищеними концентраціями рідкісних, розсіяних, а також рідкоземельних елементів.

Петрографічні дослідження міоценового вугілля Закарпаття (Хмарський, 1960) показали, що буре вугілля тут представлене лігнітами, тьмяно-блискучим штрихуватим вугіллям, напівматовим штрихуватим і матовим глинистим різновидом. Низький ступінь вуглефікації сприяв епігенетичному накопиченню рідкісних, розсіяних та кольорових металів у вугіллі закарпатських родовищ. Іншою важливою умовою концентрування мікроелементів у вугіллі є їх форма перенесення у водах, що живили торф'яне болото або омивали вугільний пласт після його поховання.

Виділяють дві основні форми накопичення, зокрема рідкісних та розсіяних елементів у вугіллі: органічну та неорганічну, мінеральну.

Дослідження форм накопичення мікроелементів у вугіллі має важливе значення не тільки для вирішення деяких генетичних питань, але і дає змогу дати оцінку перспективності вугілля на той чи інший промислово цінний елемент.

Проведені аналізи показують, що ряди рідкісних і розсіяних елементів характеризується переважно накопиченням в органічній фракції вугілля (германій, молібден, уран, берилій, бор, мідь, рідкісноземельні метали, миш'як, срібло, хром), інші ж пов'язані зазвичай із зольною частиною (титан, галій, літій, стронцій, барій). І, нарешті, третя група виявляє нестійку форму накопичення – у різних родовищах, отже й у різних умовах, форма міграції цих елементів неоднакова, переважає то органічна, то мінеральна форма. Прямітньо, що в цю групу потрапляють переважно кольорові метали та елементи зі змінною валентністю, рухливість та умови осадження яких сильно залежать від фізико-хімічних умов середовища.

Так, ванадій, хром, нікель, галій, берилій, цинк, свинець, олово переносяться головним чином у формі суспензій і лише частково в розчин. Особливо чітко це виявляється у ванадію, хрому, галію, нікелю. Вирішальну роль у пересуванні останніх грає адсорбція цих елементів міцелами глинистих частинок, гідроксидами заліза, марганцю, алюмінію.

У міді, урану, молібдену і частково ванадію і хрому сполуки вищих ступенів окиснення за умов високоокисно-відновного потенціалу майже гідролізуються, що сприяє їх міграції у розчиненому стані. Навпаки, висока гідролізованість високоокислених сполук таких

елементів, як кобальт, нікель, свинець та інші важкі елементи, значно обмежує їхню рухливість.

Активна вулканічна та поствулканічна діяльність у міоцені Закарпаття не лише сприяли накопиченню вугілля (масова загибель рослинності), а й стала потужним джерелом багатьох рідкісних та розсіяних елементів, що концентруються у вугіллі. Разом з тим широкий прояв гідротермальної діяльності, що торкнулася вулканічних порід, розвинених в областях зносу, певним чином позначився на якісному та кількісному складі мікроелементів у бурому вугіллі. Кислий характер гідротермальних розчинів зумовив переведення в рухомий стан таких рідкісних та розсіяних елементів, які у звичайних поверхневих умовах земної кори інертні чи малорухливі.

Середні та кислі лави Вигорлат-Гутинського хребта, зміна яких відбувалася синхронно з накопиченням відкладів ільницької світи, зумовили надходження у вугільні пласти характерного комплексу мікроелементів.

Винесення рідкісних і розсіяних елементів з вулканічних порід могло відбуватися подвійним чином: за рахунок хімічного вивітрювання і завдяки впливу високоактивних гідротерм. Очевидно, що вирішальну роль у мобілізації мікроелементів грали гідротермальні розчини.

Між тим, дуже слабкий винос характерний для ванадію, хрому та титану, а такі елементи як галій та цирконій зовсім не переходять у розчин.

Проте відзначається зростання у сірчано-кислому середовищі рухливості такого інертного мігранта, як берилій. Під час алуїтизації – процесі, що широко проявився на Закарпатті – із середніх та кислих лав виносяться мідь, кобальт, нікель, молібден, індій, галій, хром, рідкісні землі. Очевидно, що подібні явища спостерігалися і в міоцені Закарпаття.

Деякою відмінністю можна вважати малу рухливість галію і, можливо, хрому. Мікроелементи, що перейшли в розчин, надходили разом з поверхневими водами в басейни вуглезакопичення, де осаджувалися рослинною речовиною, що розкладається. Перенесення розчинених мікроелементів здійснювалось також підземними водами. Взаємодія збагачених рідкісними елементами поданих вод із гуміновими кислотами вже сформованих та похованих вугільних пластів призвела до епігенетичного концентрування мікроелементів.

Низький ступінь метаморфізації верхньоміоценового вугілля Закарпаття, активна поствулканічна діяльність та висока проникність вуглевмісних порід (алевроліти, піски, пухкі туффіти) сприяли епігенетичному накопиченню багатьох рідкісних та розсіяних елементів. Про це свідчить розподіл вмісту мікроелементів щодо різних частин вугільного пласту (Ільницьке родовище). Найбільш збагаченими є підошва і покрівля пласта.

Вміст же мікроелементів в центральній частині в кількох разів, іноді в десятки, нижчий, ніж у периферичних ділянках родовища.

Дещо інша картина спостерігається в алмаському вугіллі Беганського родовища. Надзвичайно висока концентрація германію, порівняно підвищені вмісти свинцю та миш'яку пояснюються специфікою гідротермальної діяльності в середньому сарматі.

У доалмаський час рудоносні термальні розчини призвели до утворення Беганського барит-поліметалічного родовища. Пізніша, ймовірно, алмаська гідротермальна діяльність виявилася в алуїтизації великих обсягів вулканогенних порід.

Утворення вторинних кварцитів супроводжувалось виномом більшості рідкісних, розсіяних і кольорових



металів з наступним осадженням їх у басейнах вугленакопичення, розташованих поруч із полями алунізації.

Слід зазначити, що кількість германію у вугільних пластах зменшується в міру віддалення від ділянок, де гідротермальна діяльність виявилася найінтенсивніше.

Розподіл цього елемента за потужністю пласта не підпорядковується будь-яким певним закономірностям, як це було встановлено для верхньопліоценового вугілля. Найімовірніше, що накопичення германію та інших мікроелементів у вугіллі Біганського родовища відбувалося в торф'яно-болотну стадію.

Аналіз отриманих даних переконливо свідчить про безперечний вплив вулканічної та гідротермальної діяльності на формування рідкіснометалічного зруденіння як у верхньопліоценовому, так і в середньосарматському вугіллі Закарпаття.

Специфіка прояву та геохімічна індивідуалізованість вулканічної та гідротермальної діяльності в середньому сарматі та верхньому пліоцені зумовили й певні відмінності як у кількісному, так і в якісному складі мікроелементів у вугіллі різних родовищ.

**Геохімічні особливості рідкіснометалічного зруденіння бурого вугілля Закарпаття.** При узагальненні та систематизації численних даних спектрального та хімічного аналізів з'ясувалося, що кожне конкретне родовище чи певна група родовищ має специфічний кількісний та якісний склад мікроелементів.

З геохімічного погляду це пояснюється лише тим, що міграція і накопичення хімічних елементів контролюється як кристалохімічними властивостями атомів (внутрішні чинники), так і фізико-хімічними умовами середовища (зовнішні чинники).

Зовнішні фактори, що визначаються геологічною та палеогеографічною обстановкою, змінюються у просторі та часі, а тому окремі буровугільні родовища Закарпаття характеризувались різними умовами накопичення рідкісних та розсіяних елементів.

Серед найбільш повно вивчених буровугільних родовищ Закарпаття можна виділити дві різновікові групи: верхньопліоценову (Березинка, Ільниця, Рокосово та ін.) та середньосарматську (родовище в районі с. Мала Бігань).

Верхньопліоценові родовища просторово тяжіють до Вигорлат-Гутинського хребта; їх формування відбувалося на фоні та за участю активної вулканічної діяльності.

Біганське родовище розташоване із західної частини Закарпаття, в межах Берегово-Біганської рудної зони. Накопичення середньосарматського бурого вугілля

відбувалося синхронно з широким проявом гідротермальної діяльності, яка привела не тільки до утворення поліметалічного (Берегово) і барит-поліметалічного (Бігань) родовищ, але й певним чином позначилася на складі рідкісних, розсіяних та кольорових металів у вугіллі.

Літологічні дослідження вугленосних товщ вказують на різний речовий склад порід, що розвивалися в алмазський та ільницький час.

Вивітрювання різнотипних по мінеральному та хімічному складу порід призводило до винесення з них певних комплексів мікроелементів.

Таким чином, специфіка вулканічної та поствулканічної діяльності у верхньому пліоцені та середньому сарматі, а також особливості речовинного складу порід, що складали області зносу, зумовили різний у кількісному та якісному співвідношенні склад мікроелементів у досліджуваному бурому вугіллі.

Справді, зіставлення середніх вмістів рідкісних, розсіяних і кольорових металів у верхньопліоценовому вугіллі показує, що Ільницьке родовище збіднене порівняно з вугіллям ільницької світи такими елементами, як молібден, скандій, нікель, кобальт, ітрій, ітербій, лантан, мідь, ванадій (табл. 1).

У той же час вугілля Біганського родовища значно збагачене германієм: середній вміст цього елемента в них набагато вищий, ніж у вугіллі Березинського, Ільницького, Рокосовського та інших верхньопліоценових родовищ.

Слід зазначити також підвищені концентрації свинцю в Біганському вугіллі; у вугіллі інших родовищ цей елемент виявляється дуже рідко.

Не викликає сумніву, що настільки надзвичайно високі вмісти германію і свинцю генетично пов'язані з барит-поліметалічним родовищем, що розташоване в безпосередній близькості від буровугільного басейну.

Формування рудних жил відбувалося, очевидно, або одночасно з вугленакопиченням, або передувало йому.

Серед верхньопліоценових буровугільних родовищ також відзначаються певні відмінності у вмісті рідкісних та розсіяних елементів, що зумовлено, мабуть, ступенем віддаленості басейну вугленакопичення від Вигорлат-Гутинського хребта. Найбільш збагачені мікроелементами буре вугілля Ільницького родовища, що утворилося в Іршавській лагуні, майже з усіх боків оточене вулканічними породами хребта.

Таблиця 1

Результати атомно-емісійного аналізу Ільницького родовища (&lt; – відповідає прочерку)

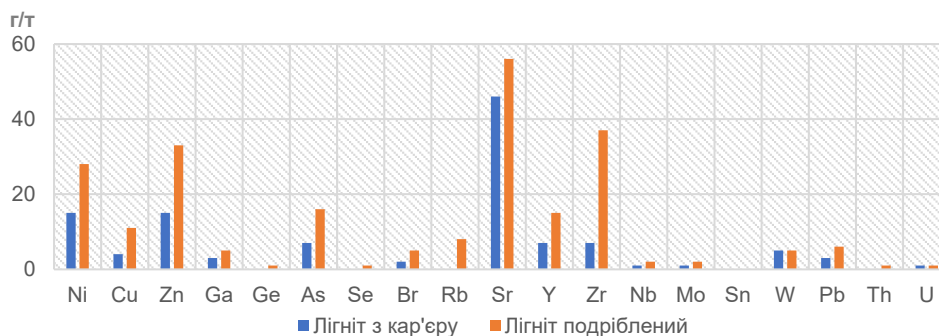
| №ч/ч | №проби | Матеріал проби   | Ti   | Mn  | V   | Zr  | Ba   | Cr  | Zn  | Ni | Cu  | Co  | Pb   | Sn   | Ag   | Mo   | Ge   | Nb  | Y   | Yb   | L   | Ce  | Sc  | Li  | Sr    | Cd | Be   | Зольність, % |
|------|--------|------------------|------|-----|-----|-----|------|-----|-----|----|-----|-----|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-------|----|------|--------------|
| 1    | 1      | на золу          | 1750 | 496 | 71  | <50 | <400 | <10 | 20  | <5 | 8   | 11  | <5   | <2   | 0,05 | <1   | <2   | <15 | <10 | <1   | <30 | <40 | <10 | <15 | 88    | <5 | <3   | 19,96        |
|      |        | на суху речовину | 349  | 99  | 14  | <10 | <100 | <2  | 4   | <1 | 1,6 | 2,2 | <1   | <0,5 | 0,01 | <0,2 | <0,5 | <3  | <2  | <0,2 | <6  | <8  | <2  | <3  | 17,56 | <1 | <0,6 |              |
| 2    | 2      | на золу          | 2220 | 563 | 109 | <50 | <400 | <10 | 29  | <5 | <5  | 8   | 5    | <2   | 0,05 | 2    | <2   | <15 | <10 | <1   | <30 | <40 | <10 | <15 | 72    | <5 | <3   | 12,97        |
|      |        | на суху речовину | 288  | 73  | 14  | <10 | <100 | <2  | 3,8 | <1 | <1  | 1   | 0,65 | <0,5 | 0,01 | 0,26 | <0,5 | <3  | <2  | <0,2 | <6  | <8  | <2  | <3  | 9,338 | <1 | <0,6 |              |

Дослідження виконано в лабораторії ННІ "Інститут геології" КНУ ім. Т. Шевченка

Таблиця 2

Результати аналізу складу зразків лігнітів Ільницького родовища (кольором відзначено підвищені концентрації)

| №                     | Проба              | Fe    | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Rb | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Sn | W   | Pb | Th | U |
|-----------------------|--------------------|-------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|---|
| 1                     | Лігніт з кар'єру   | 6533  | 15 | 4  | 15 | 3  | 0  | 7  | 0  | 2  | 0  | 46 | 7  | 7  | 1  | 1  | 0  | 5   | 3  | 0  | 1 |
| 2                     | Лігніт подріблений | 18109 | 28 | 11 | 33 | 5  | 1  | 16 | 1  | 5  | 8  | 56 | 15 | 37 | 2  | 2  | 0  | 5   | 6  | 1  | 1 |
| Межа визначення, г/т, |                    | 200   | 20 | 15 | 15 | 10 | 10 | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | 5  | -  | 100 | 5  | 5  | 5 |



Дослідження виконано в Центральній лабораторії ДП "Українська геологічна компанія"

Теплий та вологий клімат сприяв інтенсивному хімічному вивітрюванню лав та туфів, а майже повна замкнутість лагуни зумовила осаження багатьох мікроелементів на порівняно великій ділянці.

На противагу Ільницькому формуванню Рокосівського родовища відбувалося при переважанні фізичного вивітрювання порід зносу, про що свідчить велика кількість зерен ромбічного піроксену у важкій фракції вуглевмісних порід на Ільницькому родовищі – 20 %, на Рокосівському – до 80 і навіть 90 %.

Очевидно, важливе значення для переважаючого тієї чи іншої форми вивітрювання мала поствулканічна діяльність. Підйоми гідротерми змішувалися з поверхневими водами і посилювали їх активність, що призводило до інтенсифікації хімічного вивітрювання.

Таким чином, порівняно нижчі вмісти мікроелементів у рокосівському вугіллі зумовлені панівною роллю фізичного вивітрювання порід, розвинених в областях зносу в період формування родовища.

Привертає увагу постійність середнього вмісту галію у всіх вивчених буровугільних родовищах. Це свідчить про певну інертність галію в екзогенних умовах, зокрема в процесі вуглеонакопичення.

Ще однією цікавою особливістю є можливість синхронного накопичення у вугіллі низки рідкісних та розсіяних елементів. Вперше це було відмічено, зокрема при побудові літолого-геохімічних колонок свердловин, а згодом – при зіставленні узагальнених даних за кількома, найбільш повно випробуваними родовищами.

У вітчизняній та зарубіжній літературі, присвяченій дослідженню рідкісних та розсіяних елементів у вугіллі, також нерідко зазначається, що підвищеним вмістам одного елемента відповідають найвищі концентрації іншого.

Отже, у процесі вуглеутворення цілком можливе виникнення умов, сприятливих для спільного накопичення цілої низки мікроелементів.

Методи математичної статистики, зокрема кореляційний аналіз, дають змогу об'єктивно вирішувати багато геохімічних завдань, у тому числі проблему парагенезису елементів.

При оцінці стійкості зв'язку враховували суттєвість коефіцієнта рангової кореляції (не значущий, значущий, дуже значущий) та наявність залежності між певними парами елементів у всіх трьох родовищах. Виходячи з цього, можна виділити три групи:

1. Пари елементів, що характеризуються досить стійким зв'язком: Y-Yb, Be-Y, Be-Yb, Be-Mo, Mo-Yb, V-Zr.
2. Пара елементів, що характеризуються менш стійким зв'язком: Be-Ni, Be-Zr, Be-V, Mo-Y, Mo-Ni, V-Yb.
3. Пари елементів, що характеризуються нестійким зв'язком: Mo-Zr, Cu-Ni, Cu-Y, Yb-Zr, Yb-Ni.

Особняком стоїть Ga, вміст якого в золах вугілля не корелюється із вмістом жодного з мікроелементів.

Таким чином, методи кореляційного аналізу дали змогу досить точно об'єктивно встановити комплекс мікроелементів, що спільно накопичуються у вугіллі: Be-Mo-Y-Yb, Zr-V.

Цікаво відзначити, що отримані дані про синхронність накопичення деяких мікроелементів добре узгоджуються з рядом геохімічної рухливості в процесі вуглеутворення: Ge-Be-Mo-La-Y-Sc-Co-Ni-Sn-Zr-V-Zn-Cr-Ga-Pb.

У цьому ряду елементи, що стоять зліва, є більш активними та зв'язуються переважно з органічною частиною вугілля.

#### Дискусія і висновки

Закарпаття, як один із регіонів України, відомий своїми покладами бурого вугілля, що містять рідкісні метали, привертає увагу науковців до вивчення процесів їхнього формування та розподілу.

Отримані результати свідчать про те, що буровугільні пласти Закарпаття збагачуються рідкісними та рідкоземельними металами, такими як германій, індій, галій, стронцій, скандій, ітрій, ітербій, лантан під впливом кількох факторів:

1. Гідротермальні процеси: Закарпаття має активну геотектонічну історію, яка сприяла циркуляції гідротермальних розчинів через осадові породи, що привело до збагачення рідкісними металами.
2. Постосадові зміни: органічна речовина бурого вугілля може поглинати і накопичувати метали під час діагенезу та катагенезу.
3. Вмісні породи: присутність вулканогенних порід у регіоні є додатковим джерелом рідкісних металів.

Дослідження геохімії бурого вугілля також свідчать про суттєвий вплив локальних тектонічних структур. Розуміння генезису та геохімічних особливостей рідкісно-металічного зруденіння у бурому вугіллі Закарпаття є ключовим для ефективного використання цих ресурсів.

Подальші дослідження в цій галузі сприятимуть розробці нових методів видобутку та переробки, а також глибшому розумінню геологічних процесів, що приводять до формування таких унікальних покладів.

Комплексний підхід, що включає геохімічний, мінералогічний, екологічний та економічний аналізи, дасть змогу не лише зрозуміти механізми зруденіння, але й оцінити перспективи використання цих ресурсів у майбутньому.

**Внесок авторів:** Микола Бурлуцький – концептуалізація, формулювання ідеї і визначення наступних завдань досліджень, методологія, написання (оригінальна чернетка, перегляд і редагування); Станіслав Литвинюк – валідація даних, кінцева обробка матеріалів, написання (перегляд і редагування).

## Список використаних джерел

- Баряцька, Н. В. (2020). Поняття критичної мінеральної сировини – інструмент стимулювання розвитку надрокористування в Україні. *Мінеральні ресурси України*, 2, 13–18.
- Блайда, І. А., Васильєва, Т. В., Слюсаренко, Л. І., Хитрич, В. Ф., Барба, І. М., & Васильєва, Н. Ю. (2011). Вилучення германію з відходів свинцево-цинкового виробництва хімічними і мікробіологічними методами. *Хімія металів і сплавів*, 4, 206–211.
- Буллат, А. Ф., & Баранов, В. А. (2021). Аналіз стану германієносності вугілля України. У *Матеріали XIX Міжнародної конференції молодих вчених. Геотехнічні проблеми розробки родовищ*, Дніпро, 7–9.
- Бучинська, І. В., Матрофайло, М. М., Побережський, А. В., & Ступка, О. О. (2023). Германій Львівсько-Волинського басейну як можливе джерело критичної мінеральної сировини України. У *Збірник тез Всеукраїнської наукової конференції Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка Національної академії наук України*, 12–13 жовтня 2022 р. (с.11–14).
- Гольдшмидт, В. М. (1938). *Сборник статей по геохимии редких элементов*. Москва, Ленинград.
- Гончарук, О. В. (2017). *Мінералогія та геохімія рідкісних елементів у вугленосних відкладеннях Закарпаття*. ДонНТУ.
- Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року від 21 квітня 2011 року. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17>
- Іваненко, П. І. (2018). *Геохімія рідкісних елементів у вугіллі Закарпаття*. Видавництво Ужгородського національного університету.
- Левицкий, Б. П. (1960). *Отчет о результатах поисково-опробовательских работ на германий, произведенных Закарпатской экспедицией на территории Станиславской и Закарпатской областей УССР в 1958–1959 гг.* Киев. геол.-развед. трест.
- Перельман, А. И. (1964). *Атомы в природе*. Москва.
- Петров, В. С., & Коваленко, О. М. (2020). *Рідкіснометалева зруденіння в осадових басейнах України*. Наукова думка.
- Сивий, М., Паранько, І., & Іванов, І. (2013). *Географія мінеральних ресурсів України*. Простір М.
- Сидоренко, М. Г. (2019). *Геохімічні дослідження бурого вугілля Закарпаття*. Видавництво Львівського національного університету.
- Смирнов, Б. И., Лазаренко, Е. А., Левицкий, Б. П., Новикова, З. Т., & Шеремета, В. Г. (1966). *Отчет по научно-исследовательской теме: Влияние вулканических и гидротермальных процессов на формирование закарпатских углей и редкометалльной минерализации в них*. Институт минеральных ресурсов. Закарпатская геологоразведочная партия.
- Хмарский, Н. З. (1960). Петрографическая характеристика миоценовых углей Закарпатия и некоторые вопросы их генезиса. *Научные записки Днепропетровского государственного университета*, 59.
- Müller, C., & Fuchs, H. (2017). *Rare Metal Enrichment in Lignite Deposits: Case Studies from Central Europe*. Elsevier.
- Smith, J. A., & Brown, L. K. (2015). *Geochemistry of Rare Earth Elements in Brown Coal Deposits: A Global Perspective*. Springer.
- Vyzhva, S. A., Deineko, S. I., Demidov, V. K., & Astashkina, O. A. (2010, May). Dynamic geologic-geophysical model of chalky layer and dispersible soils on territory of the RNPP site. In 9th EAGE International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects (pp. cp-184). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Wang, P., & Zhao, L. (2019). *Geochemical Characteristics of Trace Elements in Coal: A Focus on Rare Metals*. Taylor & Francis.
- Zhao, C., & Li, X. (2021). *Coal-Bearing Deposits as Potential Sources of Rare Metals: An International Review*. CRC Press.

## References

- Bariatska, N.V. (2020). The concept of critical mineral raw materials – a tool for stimulating the development of subsoil use in Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 13–18 [in Ukrainian].
- Blyda I. A., Vasylieva T. V., Slysarenko L. I., Khytrych V. F., Barba I. M., & Vasylieva N. Yu. (2011). Extraction of germanium from lead-zinc production waste by chemical and microbiological methods. *Chemistry of metals and alloys*, 4, 206–211 [in Ukrainian].
- Buchynska I.V., Matrofailo M.M., Poberezhskyi A.V., Stupka O.O., & Lazar G.I. (2023). Distribution of germanium in coal of the LvivVolyn coal basin. *Geological magazine*, 4, 35–49. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.284910> [in Ukrainian].
- Bulat A. F., & Baranov V. A. (2021). Analysis of the germanium content of Ukrainian coal. In *Proceedings of the XIX International Conference of Young Scientists. Geotechnical problems of deposit development* (pp. 7–9). Dnipro [in Ukrainian].
- Goldshmit V.M. (1938). *Collection of articles on the geochemistry of rare elements*. M., Leningrad [in Russian].
- Goncharuk O.V. (2017). *Mineralogy and geochemistry of rare elements in the coal-bearing deposits of Zacarpattia*. DonNTU [in Ukrainian].
- Ivanenko P.I. (2018). *Geochemistry of rare elements in the Vugilla of Transcarpathia*. Uzhgorod: University of Uzhgorod National University [in Ukrainian].
- Khmarsky N.Z. (1960). Petrographic characteristics of Miocene coals of Zacarpattia and some questions of their genesis. "Scientific Notes" of Dnepropetrovsk State University, 59 [in Russian].
- Levytskyi B. P. (1960). *Report on the results of prospecting and testing for germanium, carried out by the Transcarpathian Expedition on the territory of the Stanislavsky and Transcarpathian regions of the Ukrainian SSR in 1958–1959*, (T. 1). Kyiv. geol.-exploration trust [in Russian].
- Müller, C., & Fuchs, H. (2017). *Rare Metal Enrichment in Lignite Deposits: Case Studies from Central Europe*. Elsevier.
- Perelman A.I. (1964). *Atoms in nature*. M. [in Russian]
- Petrov V.S., & Kovalenko O.M. (2020). *Rare metal mineralization in siege basins of Ukraine*. Kiev: Naukova Dumka [in Ukrainian].
- Sidorenko M.G. (2019). *Geochemical studies of brown vugill in Transcarpathia*. Lviv: Education of the Lviv National University [in Ukrainian].
- Siviy M., Paranko I., & Ivanov I. (2013). *Geography of mineral resources of Ukraine: monograph*. Lviv: Prostr M. [in Ukrainian].
- Smirnov B.I., Lazarenko E.A., Levitsky B.P., Novikova Z.T., & Sheremeta V.G. (1966). *Report on the research topic: The influence of volcanic and hydrothermal processes on the formation of Transcarpathian coals and rare metal mineralization in them*. Simferopol: Institute of Mineral Resources. Transcarpathian geological exploration party [in Russian].
- Smith, J.A., & Brown, L.K. (2015). *Geochemistry of Rare Earth Elements in Brown Coal Deposits: A Global Perspective*. Springer.
- The national program for the development of the mineral and raw material base of Ukraine for the period up to 2030 from April 21, 2011 [in Ukrainian].
- Vyzhva, S. A., Deineko, S. I., Demidov, V. K., & Astashkina, O. A. (2010, May). Dynamic geologic-geophysical model of chalky layer and dispersible soils on territory of the RNPP site. In 9th EAGE International Conference on Geoinformatics-Theoretical and Applied Aspects (pp. cp-184). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Wang P., & Zhao L. (2019). *Geochemical Characteristics of Trace Elements in Coal: A Focus on Rare Metals*. Taylor & Francis.
- Zhao C., & Li X. (2021). *Coal-Bearing Deposits as Potential Sources of Rare Metals: An International Review*. CRC Press.

Отримано редакцією журналу / Received: 24.03.25

Прорецензовано / Revised: 04.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Mykola BURLUTSKYY, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0009-0000-6718-3006

e-mail: Nikolay2205@ua

State Geology and Subsoil Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Stanislav LYTUVNIUK, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

State Commission of Ukraine on Mineral Resources, Kyiv, Ukraine

GENESIS AND GEOCHEMICAL FEATURES OF  
RARE METAL MINERALIZATION IN THE BROWN COAL OF TRANSCARPATIA

**Background.** On January 17, 2025, Law of Ukraine No 4154-IX "On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine Regarding Updating the State Program for the Development of Mineral and Raw Materials Base of Ukraine for the Period Until 2030 and Regulation of Certain Issues Regarding Minerals and Components of Strategic and Critical Importance", amending the Code of Ukraine on Subsoil and the National Program for the Development of the Mineral and Raw materials Base of Ukraine for the Period Until 2030 was passed.

**Current research is aimed at the complex study of coal deposits development with extraction of associated minerals and components. In addition, the possibility of obtaining rare earth and other valuable components from brown coal and stockpiles is being considered.**

**Transcarpathia, as one of the regions of Ukraine, known for its deposits of brown coal, which contain rare metals and rare earth elements, attracts attention of scientists.**

**Methods.** The research on the genesis of rare metal mineralization, analysis of the influence of volcanic and hydrothermal processes on the formation of brown coal and rare metal mineralization is focused on:

• **analytical methods: use of modern analytical methods, such as inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), to determine the concentration of rare metals;**



- *modeling processes: development of models to describe the behavior of rare metals during carbonization and the influence of various factors on their distribution;*
- *economic assessment: assessment of the potential of the extraction of rare metals from brown coal as an additional reservoir of valuable elements.*

*It should be noted that rare metal mineralization in brown coal is an important object of investigation due to its economic significance and unique geochemical characteristics.*

*During the period of field work, the Transcarpathian Geological Survey Party of the Institute of Mineral Resources selected and analyzed >3000 samples of brown coal and carbonaceous sedimentary materials and volcanic rocks. What is important is the number of samples collected from core material (Began, Berezinka, Rokosovo, Novoselytsya, Kriva), as well as from Girnichy extractions (Illytsia - mine No. 33, Gorbki – mine No. 29-bis).*

*Based on the results of various analyses, it was established that some rare and rare earth metals are associated with organic parts of coal, some are concentrated in the ash part and thereby enrich terrigenous material with microelements, which gradually become present in brown coal.*

**R e s u l t s .** *The clear and simple differences in the storage of microelements, as established by analyses, are determined by the specificity of volcanic and hydrothermal activity in various regions of Transcarpathia, and by the peculiarities of paleogeographic formation of coal deposits.*

*The study of the forms of accumulation of microelements in brown coal is of great importance not only for the development of certain genesis, but also allows us to assess the prospects of brown coal for its industrial value.*

*Recently, a number of methods of mathematical statistics, including coefficients of rank correlation, have been able to identify a number of elements, the accumulation of which is generated synchronously, which opens up new prospects for a complex history of Transcarpathian brown coal.*

*The combination of microelements in brown coal and clark in the earth's crust clearly indicates the role of organic matter in concentrating rare metals and rare earth elements.*

**C o n c l u s i o n s .** *The results show that the brown coal seams of Transcarpathia are rich in rare and rare earth metals such as germanium, indium, gallium, strontium, scandium, niobium, terbium, lanthanum under the influence of several factors:*

*1. Hydrothermal processes: Transcarpathia has an active geotectonic history, which resulted from the circulation of hydrothermal vents through sedimentary rocks, which led to the enrichment by rare metals.*

*2. Post-sedimentary changes: Organic brown coal deposits can become clayey and accumulate metals during diagenesis and catagenesis.*

*3. Local rocks: The presence of volcanic rocks in the region is an additional source of rare metals.*

*Investigations into the geochemistry of brown coal also indicate the ongoing influence of local tectonic structures.*

*The understanding of the genesis and geochemical features of rare metal mineralization in the brown coal of Transcarpathia is the key for the effective development of these resources.*

*Further study will involve the development of new methods of extraction and processing, as well as the deeper understanding of geological processes that lead to the formation of such unique deposits.*

*A comprehensive approach, including geochemical, mineralogical, ecological, and economic analyses, will allow not only understanding the mechanisms of mineralization, but also assessing the prospects for using these resources in the future.*

**K e y w o r d s :** *critical mineral ore, germanium, drilling and coal deposits, rare earth and rare metals, volcanic and hydrothermal activity.*

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

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

## ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.3:[553:546.296(477.42)]

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.11>

Сергій ШАРИКОВ, асп.  
ORCID ID: 0009-0009-2847-2820  
e-mail: s.sharikov@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Дмитро ЧОМКО, канд. геол. наук, доц.  
ORCID ID: 0000-0001-8454-5531  
e-mail: chomko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## ПЕРСПЕКТИВИ ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МІНЕРАЛЬНИХ РАДОНОВИХ ВОД У ВІННИЦЬКІЙ ОБЛАСТІ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

**Вступ.** Перспективи збільшення мінерально-сировинної бази України є однією з основних стратегій розвитку нашої країни як сьогодні, так і в повоєнний період.

Питання збільшення кількості загальних затверджених запасів мінеральних радонових вод за рахунок відкриття нових родовищ, сьогодні, через високу вартість, практично не розглядається. Проте детальний аналіз з метою можливого збільшення експлуатаційних запасів на базі вже розвіданих родовищ – є досить перспективним.

Дана робота підпадає під одну із складових плану досягнення спільного кращого майбутнього, ухваленого членами Організації Об'єднаних Націй у 2015 р. (17 цілей сталого розвитку). Матеріал, викладений у статті, відноситься до 3 пункту, а саме – Забезпечення здорового способу життя та сприяння благополуччю для всіх у будь-якому віці.

Радонові мінеральні води є бальнеологічними підземними водами, що мають лікувальні властивості при внутрішньому чи зовнішньому застосуванні. Важливим фактором під час експлуатації таких підземних вод є їх відповідність кондиціям, тобто встановленим гранично допустимим концентраціям (далі – ГДК), які є чинними на сьогодні.

В різні періоди часу в межах Вінницької області проводились різні стадії розвідки родовищ мінеральних радонових вод – від пошукових робіт до детальної розвідки. Тому детальний аналіз дієвих родовищ, оцінка перспектив їх розширення чи збільшення експлуатаційних запасів, визначення ресурсного потенціалу установ, які спеціалізуються на видобутку радонових підземних вод є, на думку авторів, важливим завданням.

**Методи.** Дане дослідження проведено на підставі детального аналізу фондових матеріалів та порівняння фактичних результатів вмісту радонових мінеральних вод різних родовищ у межах Вінницької області.

**Результати.** Завдяки проведеним дослідженням встановлено, що в межах Курортної ділянки, яка розташована в м. Немирів, є потенціал до збільшення експлуатаційних запасів мінеральних радонових вод. Дане твердження базується на аналізі даних попередньої (1985 р.) та детальної (2004 р.) розвідки.

**Висновки.** Дослідження показали, що збільшення експлуатаційних запасів мінеральних радонових вод можливе за рахунок недіючої (на сьогодні) експлуатаційної свердловини № 6-Р. Під час детальної оцінки експлуатаційних запасів свердловину виключили з підрахунку запасів через перевищення вмісту нітратів ( $>65 \text{ мг/дм}^3$ ) згідно з Галузевим стандартом України (ГСТУ) 42.10-02-96 "Води мінеральні лікувальні. Технічні умови". Проте підвищений вміст нітратів, напевно, не є результатом забруднення цільового водоносного горизонту, а є швидше наслідком радіолізу води. Більш детальні дослідження цієї проблеми могли б привести до удосконалення чинних нормативних вимог до мінеральних вод, які використовуються саме для зовнішнього застосування.

**Ключові слова:** радон, мінеральні радонові підземні води, родовище, запаси, якість підземних вод.

### Вступ

За роки незалежності в межах Вінницької області, станом на 01.01.2025 р. розвідано кілька родовищ радонових мінеральних вод, де підтверджено параметри постійних кондицій і води відповідають сучасним нормативним документам. Нижче наведено короткий аналіз цих родовищ.

1. В. Погонина "Предварительная разведка минеральных радоновых вод на Угриновском участке Хмельникского месторождения за 1990–1993 гг. (Хмельникский р-н Винницкой области)." Київ 1994 р.

2. М. Мілюхін, А. Шеремета "Звіт про результати детальної розвідки з підрахунку запасів експлуатаційних запасів мінеральних радонових вод Немирівського родовища (санаторій "Авангард") Вінницької області, проведеної в 1997–2002 р.р." 2005 р.

3. П. Ляшенко "Геолого-економічна оцінка Острівної ділянки Хмельницького родовища мінеральних радонових вод, 2005–2007 р.р." 2005 р.

4. І. Шум "Геолого-економічна переоцінка експлуатаційних запасів підземних мінеральних радонових вод Голодківської ділянки (св. №№ 1981-1, 1983) та ділянки Курортна (св. №№ 5-рк, 8-рк, 18-рк) Хмельницького родовища у м. Хмельник Вінницької області".

Слід зазначити, що на сьогодні в межах України діє ГСТУ 42.10-02-96 "Води мінеральні лікувальні. Технічні умови". До прийняття цього документу вміст радону вимірювався у  $\text{нКи/дм}^3$ , вже після 1996 р. – у  $\text{Бк/дм}^3$ . Згідно із цим ГСТУ мінеральними радоновими водами вважаються ті, які мають вміст радону, вищий за  $185 \text{ Бк/дм}^3$ .

**Мета.** Перспективи збільшення мінерально-сировинної бази країни в післявоєнний період є однією із ключових стратегій розвитку економіки та соціальної інфраструктури України. Так, мінеральні радонові води, що мають унікальні лікувальні властивості, можуть посісти одне з ключових місць у реабілітації військових та цивільного населення, розвитку курортної сфери та впровадження бальнеологічного медичного туризму.

Протягом ХХ–ХХІ ст. на території Вінницької області проводились пошукові геологорозвідувальні дослідження з виявлення та вивчення мінеральних радонових вод. Проте ці дослідження та чинна нормативно-правова база України не враховують сучасних критеріїв оцінки якості підземних вод та перспектив подальшого використання таких вод власне для зовнішнього застосування. Так, одним з важливих, але недостатньо вивчених залишається питання формування та трансформації хімічного складу радонових вод у процесі експлуатації, вплив

© Шаріков Сергій, Чомко Дмитро, 2025

природних та антропогенних чинників на зміну якісних показників і, як наслідок, збільшення ресурсного потенціалу дієвих родовищ із можливістю їх розширення.

Тож вивчення питань системного аналізу стану, потенціалу та динаміки мінеральних радонових вод Вінницької області як частини Північно-Західного регіону Українського кристалічного щита з метою збереження, збільшення та безпечного використання є актуальною проблемою.

**Огляд літератури.** У статті, опублікованій в "International Journal of Environmental Analytical Chemistry" (Seid, Turhan, Bakir, & Kurnaz, 2023), аналізуються комплексні хімічні аналізи проб бутильованої води на вміст радону. Загалом було проаналізовано 49 зразків мінеральної бутильованої води від 22 брендів, які продаються в Туреччині. Встановлено, що вміст радону в цих пробах коливається в межах 30,6–57,6 мБк/дм<sup>3</sup>, із середнім значенням 43,1±6,1 мБк/дм<sup>3</sup>.

Додатково проводились вимірювання показників рН, солоності та загальної кількості розчинених твердих речовин. За результатами цього дослідження встановлено, що всі отримані значення – у межах рекомендованих норм Всесвітньої організації охорони здоров'я та Європейського Союзу для питної води, і бутильована вода, що досліджувалась, не становить ризику для життя та здоров'я населення.

Комплексні дослідження щодо режимних спостережень за вмістом радону у питних водах проводять і в Україні. Так, у статті Бузинного та Михайлової (2022) представлено результати моніторингових досліджень за 20-річний період щодо концентрації радону-222 у питній воді України за період з 2003 по 2021 р. Загалом проаналізовано 1228 зразків води із свердловин у 23 областях України. У результаті цих досліджень встановлено, що в 11 % зразків вміст радону-222 перевищує встановлену державну та європейську норму для питної води, яка становить 100 Бк/дм<sup>3</sup>.

Найвищі концентрації вмісту радону-222 виявлено в регіонах, розташованих на Українському кристалічному щиті, зокрема в Київській, Житомирській, Черкаській та Вінницькій областях. Слід відзначити, що саме в цих областях розташовані найбільш відомі родовища мінеральних радонових вод.

Автори статті наголошують на необхідності детального вивчення радіоактивності підземних вод у цих регіонах та впровадження заходів для покращення радіаційної безпеки питної води. Також підкреслюється важливість розширення моніторингу на інші недосліджені (малодосліджені) джерела водопостачання для мінімізації радіаційного впливу на населення.

У статті Нікіпелової, Кисилевської та Солодової (2010) наведено аналіз сучасного стану нормативно-правової бази України щодо мінеральних вод та запропоновано шляхи її вдосконалення. Особливу увагу автори приділили саме розробці гігієнічних норм і нормативів, які б відповідали міжнародним та європейським стандартам з урахуванням національних особливостей.

Автори зазначають, що на сьогодні в Україні діють стандарти Державний стандарт України (ДСТУ) 878-93 "Води мінеральні питні. Технічні умови" та ГСТУ 42.10-02-96 "Води мінеральні лікувальні. Технічні умови", які регулювали вимоги до фасованих мінеральних вод та лікувальних вод, що використовуються в санаторно-курортній практиці при зовнішньому застосуванні відповідно. Однак ці стандарти потребують оновлення відповідно до міжнародних вимог.

Відзначається, що першим кроком у вирішенні цього питання має бути розробка та затвердження гігієнічних

нормативів, які визначають параметри безпечності та якості мінеральних вод. Такі нормативи мають стати основою для створення нових санітарно-гігієнічних вимог до мінеральних вод та підприємств, що займаються їх виробництвом, фасуванням, використанням у лікувальних цілях при внутрішньому та зовнішньому застосуванні. Розробка таких нормативів сприятиме підвищенню надійності оцінки потенційних ризиків для здоров'я населення та забезпеченню відповідності українських стандартів до міжнародних.

Автори статті також порушують питання щодо впровадження нових редакцій національних стандартів на лікувальні води, що будуть враховувати в сучасні наукові досягнення та практичний досвід. Це дозволить забезпечити високий рівень контролю якості та безпечності мінеральних вод, що використовуються.

У висновках автори звіту відзначають про необхідність проведення реформ щодо вдосконалення нормативно-правової бази України у сфері мінеральних вод, що є важливим кроком для інтеграції вітчизняних стандартів до міжнародного правового поля та забезпечення високої якості та безпечності мінеральних вод для споживачів.

### Результати

Згідно з ГСТУ 42.10-02-96 "Води мінеральні лікувальні. Технічні умови" ГДК токсичних компонентів лікувальних мінеральних вод щодо концентрації вмісту нітратів (по NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) має бути не більш як 50 мг/дм<sup>3</sup>. Проте дане твердження базувалося на забрудненні цільових водоносних горизонтів під впливом сільськогосподарської діяльності, побутових стічних вод, відходів тваринництва – тобто має місце явно виражений антропогенний вплив на підземні води. Так, під час детальної розвідки Острівної ділянки Хмільницького родовища мінеральних радонових вод було зафіксовано підвищений вміст нітратів до 150 мг/дм<sup>3</sup>.

Проте антропогенний фактор для родовищ мінеральних радонових вод не є базовим. На родовищах мінеральних радонових вод може відбуватися деяка метаморфізація хімічного складу слабомінералізованих гідрокарбонатних кальцієвих вод, а також розчинених у воді газів завдяки продуктам радіолізу води.

Розчинені у воді гази під впливом випромінювання переходять у зв'язаний стан, наприклад інертний азот перетворюється на амонійний, нітритний та нітратний іони. Радіоліз підземних вод, зумовлений виділенням енергії в радіаційному полі землі, викликає генерування кисню та утворення водню. У таких випадках підвищений вміст нітратів у воді не може бути показником їх забруднення.

Тож приведення нормативною бази до єдиного значення або внесення певних критеріїв саме для родовищ мінеральних радонових вод є одним із невирішених питань сьогодення.

Протягом 1997–2002 рр. проводили детальну розвідку ділянки "Курортна" Немирівського родовища (свердловини № 5, 10-Р) мінеральних радонових вод для зовнішнього лікування у Немирівському районі Вінницької області (Мілюхін, & Шеремета, 2005).

Ділянка "Курортна" Немирівського родовища, власником якого є Закрите акціонерне товариство "Укрпрофоздоровниця" (далі ЗАТ "Укрпрофоздоровниця") розташоване на південно-східній околиці м. Немирів Вінницької області, у парковій зоні санаторію "Авангард", на лівому березі р. Устя. Згідно з дозволом на користування надрами (ліцензією – на момент оцінки), родовище розкрито двома свердловинами: № 5, 10-Р.

Слід зауважити, що на розгляд Державної комісії України по запасам корисних копалин (ДКЗ) подавалися експлуатаційні запаси також і по свердловині № 6-Р.



Проте, зважаючи на підвищений вміст нітратів ( $>65 \text{ мг/дм}^3$ ), їх виключено з підрахунку запасів.

Загалом у межах родовища пробурено та досліджено ще свердловини, зокрема № 6-Р, які в процесі попередньої та детальної розвідки виявились або малодебітними або некондиційними відповідно до чинного законодавства.

#### Методика проведення робіт.

Згідно з технічним завданням та відповідно до стадійності проведення геологорозвідувальних робіт виконано такий комплекс робіт на родовищі:

##### 1. Вивчення, збір і аналіз фондових матеріалів.

Даний вид робіт є дуже важливим. Фактично будь-яка геолого-економічна оцінка починається з вивчення фондових матеріалів. Автори проаналізували два звіти: щодо попередньої розвідки та пошуку мінеральних радових вод у межах родовища.

Додатково були зібрано фактичні дані, що стосуються режимних спостережень (дані статичних і динамічних рівнів, загальний водовідбір по родовищу), та всі наявні хімічні аналізи проб води з експлуатаційних свердловин № 5, 10-Р та інших свердловин родовища, які не увійшли до підрахунку запасів.

##### 2. Санітарно-гідрогеологічне та екологічне обстеження району родовища.

В період проведення польових робіт у 1997–2002 рр. виконано обстеження району родовища, а саме в межах II та III зон санітарної охорони. Встановлено, що гідрогеологічна ситуація експлуатаційних свердловин № 5, 10-Р загалом позитивна.

##### 3. Комплекс режимних спостережень.

На час проведення геолого-економічної оцінки спостереження за режимом підземних вод на родовищі велись постійно (заміри статичних та динамічних рівнів, контроль за водовідбором). Додатково відбирались хімічні аналізи проб води на різні компоненти, а особливо на радон. Загалом на постійній основі виконувався такий комплекс досліджень:

- заміри рівнів по всіх водозабірних свердловинах, які перебувають на балансі санаторію "Авангард" (мінеральні радонові та господарсько-питні потреби);
- заміри дебітів свердловин;
- контроль за загальним водовідбором по родовищу;
- відбір проб води на скорочений/повний хімічний аналіз, визначення мікробіологічних досліджень, визначення вмісту радону;

##### 4. Проведення дослідних відкачок.

Дослідні роботи на родовищі проводили у два етапи: перший – 1997–1998 рр. – дослідні польові гідрогеологічні роботи; 1999 р. – перше півріччя 2000 р. – камеральні роботи; другий – 2000–2001 рр. – дослідні польові гідрогеологічні роботи; 2002 р. – камеральні роботи.

На першому етапі провели дослідні відкачки тривалістю по 15 діб кожна як з експлуатаційних свердловин № 5, 10-Р, так і зі свердловин, які використовуються як господарсько-питні.

На другому етапі провели вже дослідно-експлуатаційну відкачку по свердловинах № 5, 10-Р із водовідбором, що відповідала перспективній потребі надрокористувача.

Дослідна відкачка із свердловини № 10-Р проводилась в цілодобовому режимі з дебітом  $120 \text{ м}^3/\text{д}$  ( $5 \text{ м}^3/\text{год}$ ) і тривала 20 діб. Статичний рівень сягав 15,5 м, за зазначеного дебіту зниження рівня становило 14,0 м.

По свердловині № 5 проводили дві відкачки. Дослідна відкачка із свердловини № 5 відбувалась у цілодобовому режимі з дебітом  $120 \text{ м}^3/\text{д}$  ( $5 \text{ м}^3/\text{год}$ ) і тривала

193 доби. Статичний рівень сягав 4,59 м, зниження рівня становило 23,8 м за зазначеного дебіту.

Друга відкачка проводилась з дебітом  $40 \text{ м}^3/\text{д}$  ( $5 \text{ м}^3/\text{год}$ ), працювала по 8 годин на добу і тривала 30 діб. Статичний рівень сягав 4,59 м, зниження рівня становило 23,8 м за зазначеного дебіту.

Основною метою проведення дослідних відкачок в експлуатаційних свердловинах № 5, 10-Р як в звичайному, так і в експлуатаційному режимах було визначення розрахункових гідрогеологічних параметрів водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію та встановлення якісних показників підземних вод.

Дослідні відкачки проводились за загальноприйнятою методикою. За їх результатами визначили основні гідрогеологічні параметри, а саме водопровідність експлуатаційних свердловин (табл. 1).

Таблиця 1

Розраховані дані водопровідності по дослідних відкачках

| № св-н  | Водопровідність, $\text{м}^2/\text{д}$ |
|---------|----------------------------------------|
| 5       | 12,3                                   |
| 10-Р    | 13,9                                   |
| Середнє | 13,1                                   |

##### 5. Комплекс лабораторних досліджень.

Для визначення параметрів постійних кондицій у процесі геологорозвідувальних робіт відібрано проби води на різні компоненти, додатково проаналізовано хімічні аналізи, надані замовником. Загалом у звіті проаналізовано проби води за період 1984–2001 рр., а саме:

- повний хімічний аналіз – 132 проби;
- вміст радіаційних елементів – 126 проб;
- польові визначення радону – 505 проб;
- вміст нітратів – 94 проби;
- польові визначення нітратів – 271 проба.

**Геологічна та гідрогеологічна будова родовища.** У структурі Українського щита район робіт займає західну окраїну Дністровсько-Бузького мегаблока в місці зчленування Подільського та Середньобузького блоків I порядку. Має триярусну будову: нижній ярус складений ранньодкембрійськими метаморфічними та ультраметаморфічними породами, сформованими протягом кількох тектонічних циклів і за різних термодинамічних умов. Майже повсюдно (за винятком ділянок у долинах річок) він перекритий осадами покривного і четвертинного ярусів. Покривний комплекс разом з повсюдно розвиненою площинною корою вивітрювання має потужність до перших десятків метрів. Генетично це дуже різномірні породи – від континентальних глин і пісків до морських вапняків, що розвинуті більше на південному заході території. Четвертинні відклади представлені субаквальними і лесовими фаціальними різновидами. Район робіт розташований у межах глибинного розлому, що розділяє структурно-формаційні зони (блоки I порядку).

Метаморфічні утворення представлені породами гайсинського ультраметаморфічного комплексу, а саме плагіогранітами та плагіомігматитами біотитовими.

Кайнозойські відкладення мають практично повсюдне поширення і представлені відкладами неогену і четвертинної системи.

Немирівське родовище мінеральних радонових вод у тектонічному плані належить до перетину Муховецько-Монастирецького та Ладизин-Брацлавського розломів. За межами тектонічних розломів кристалічні породи є практично безводними, нижче зон тріщинуватості спостерігається перехід до монолітних порід кристалічного фундаменту.

Немирівське родовище (ділянка "Курортна") розташоване в південно-західній частині гідрогеологічної провінції складчастої області Українського кристалічного щита. В межах родовища вивчені такі водоносні горизонти:

- у сучасних алювіальних відкладах заплав і днищ балок;
- у середньо-верхньочетвертинних еолово-делювіальних відкладах (вододілів і їх схилів);
- у відкладах балтської світи;
- у тріщинних зонах кристалічних порід докембрію.

Зважаючи на той факт, що в межах родовища експлуатаційним є водоносний горизонт тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію, нижче наводимо його детальну характеристику.

**Водоносний горизонт тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію** розкритий експлуатаційними свердловинами № 5, 10-Р та містить лікувальні радонові води, які з 1995 р. санаторій "Авангард" використовує для лікувальних потреб зовнішнього застосування.

Для родовищ, пов'язаних із породами кристалічного фундаменту, важливе значення має їх (порід) тріщинуватість. У межах ділянки "Курортна" інтенсивна тріщинуватість кристалічних порід генетично та просторово пов'язана із зоною Муховецько-Монастирецького розлому, що перетинає родовище з північного заходу на північний схід. Так, у 1984 р. на стадії попередньої розвідки в межах розлому було пробурено свердловини № 7-Р, 8-Р, 11-Р.

За межами цього розлому активна тріщинуватість різко зменшується, що підтверджується майже безводними свердловинами № 9-Р, 14, 15, що пробурені на відстані 60–100 м від Муховецько-Монастирецького розлому.

Зазначений факт свідчить про високу анізотропію фільтраційних властивостей кристалічних порід докембрію в межах родовища. Абсолютні відмітки статичних рівнів підземних вод Немирівського родовища змінюються від 243,1 м (свердловина № 11-Р, розміщена на північному сході) до 227,1 м (на півдні свердловина № 6-Р). Загалом підземний стік у північно-західній та північній частинах Курортної ділянки спрямований на південний схід у напрямку до зони Муховецько-Монастирецького розлому. І навпаки, у південно-східній та південній частинах Курортної ділянки він спрямований у протилежну сторону, тобто на північний схід та північ – в напрямку до зони Муховецько-Монастирецького розлому, а також до тектонічного "вузла" – перетин Муховецько-Монастирецького та Ладизжин-Брацлавського розломів.

Найбільш водозбагаченими є свердловини, розташовані в зоні впливу Муховецько-Монастирецького розлому. За межами розлому дебіти свердловин становлять менше 0,01 дм<sup>3</sup>/с.

На стадії попередньої розвідки (1987 р.) проводились поінтервальні випробування експлуатаційних свердловин, що склали в основному 10–30 м, рідше 10–50 м активної тріщинуватості порід. Так, під час проведення групової дослідної відкачки по свердловинах № 6-Р, 8-Р до спостережної мережі додали свердловини № 9-Р, 10-Р, 11-Р, 14. При досягненні максимального дебіту на рівні 408 м<sup>3</sup>/д зниження рівня у спостережних свердловинах не спостерігалось, також протягом всієї експлуатаційної відкачки (99 діб) зниження рівня не було. Цей дослід зайвий раз підтверджує твердження про те, що режим рівнів підземних вод по водоносному горизонту кристалічних порід докембрію більшою мірою залежить від інфільтрації атмосферних опадів.

Для підтвердження цього твердження на другому етапі дослідних робіт проводили відкачку із свердловини

№ 5 протягом 194 доби, де як спостережні виступали свердловини № 6-Р, 8-Р. Реакції не відбувалося.

Вміст радону у воді, а саме його максимальна концентрація, спостерігався у свердловинах, розташованих у зоні саме тектонічного "вузла". Це свердловини № 6-Р, 7-Р. По свердловині № 7-Р за даними попередньої розвідки концентрація радону становила 60 нКи/дм<sup>3</sup> (2220 Бк/дм<sup>3</sup>).

Відповідно до детальної розвідки води у водоносному горизонті докембрійських порід можна віднести до дуже слаборадонових (вміст радону понад 10 нКи/дм<sup>3</sup> або 370 Бк/дм<sup>3</sup>), що належать до Муховецько-Монастирецького та Ладизжин-Брацлавського розломів.

Поза межами цих розломів та тектонічного "вузла", слаботріщинуваті докембрійські породи містять практично прісні води, де вміст радону становить менше 5 нКи/дм<sup>3</sup> або 185 Бк/дм<sup>3</sup>.

Так, концентрація радону у свердловинах Немирівського родовища (ДП УГК "Nemiroff"), що розташовані на протилежному боці р. Устя, за даними розвідки 2012 р. становить <1,0·10<sup>-12</sup> Бк/дм<sup>3</sup>.

У цьому ж звіті відбирались проби на визначення вмісту нітратів із р. Устя та з четвертинного водоносного горизонту. Вміст нітратів із криниці становив 14 мг/дм<sup>3</sup>, р. Устя – 0,6 мг/дм<sup>3</sup>. Виходячи з цього можна зробити висновок, що джерело забруднення цільового водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію відсутнє і підвищений вміст нітратів у свердловинах ділянки "Курортна" є наслідком радіолізу води.

**Якісна характеристика ділянки "Курортна" Немирівського родовища мінеральних радонових вод.**

Мінеральні радонові води ділянки "Курортна" Немирівського родовища свердловинами № 5, 10-Р розкривають водоносний горизонт тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію та функціонують на території санаторію "Авангард" з 1992 р., використовуються в лікувальній практиці для зовнішнього застосування.

Підземні радонові води в межах гідрогеологічної провінції Українського кристалічного щита генетично та просторово пов'язані з тріщинуватими зонами кристалічних порід докембрію. Радонові води в цих тріщинах строкаті за петрографічним складом і належать зазвичай до гнейсів, гранітів та їх мігматитів, гранодіоритів, чарнокітів, амфіболітів та інших різновидів магматичних, ультраметаморфічних та метаморфічних порід.

Згідно з довідкою про кондиції параметри постійних кондицій для ділянки "Курортна" Немирівського родовища (свердловини № 5, 10-Р) мінеральної радонової води такі:

- води є гідрокарбонатні магнієво-натрієві;
- загальна мінералізація – до 1,0 г/дм<sup>3</sup>;
- концентрація радону у воді – 185–740 Бк/дм<sup>3</sup>;
- вміст нітратів – до 65 мг/дм<sup>3</sup>;
- значення рН 6,8–7,4 од. рН;
- температура вод – від 8 °С до 12,0 °С.

За результатами проведених хімічних досліджень по свердловині № 5 встановлено, що за співвідношенням основних аніонів і катіонів підземні води водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію належать до слабомінералізованих (0,65–0,8 г/дм<sup>3</sup>) гідрокарбонатних магнієво-кальцієвих, дуже слаборадонових (303,4–799,2 Бк/дм<sup>3</sup>).

За результатами проведених хімічних досліджень по свердловині № 10-Р встановлено, що за співвідношенням основних аніонів і катіонів підземні води водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію належать до слабомінералізованих (0,651–0,848 г/дм<sup>3</sup>) гідрокарбонатних магнієво-

кальцієвих, дуже слаборадонових (225,7–662,3 Бк/дм<sup>3</sup>) та слаборадонових (802,9–943,5 Бк/дм<sup>3</sup>).

В результаті радіохімічних випробувань встановлено відповідність якості води по показниках щодо параметрів кондиції.

#### Дискусія і висновки

За результатами виконаних геологорозвідувальних робіт на ділянці "Курортна" Немирівського родовища мінеральних радонових вод у м. Немирів, у районі Вінницької області, можна зробити такі висновки.

Виконано комплекс лабораторних гідрохімічних досліджень з виявлення та встановлення кондиційності мінеральних радонових вод ділянки "Курортна" Немирівського родовища. Вміст радону у воді по свердловинах № 5, 10-Р становить 185–740 Бк/дм<sup>3</sup>.

В межах родовища розташована свердловина № 6-Р, щодо якої не підтверджувались параметри постійних кондицій, а саме – перевищення вмісту нітратів (>65 мг/дм<sup>3</sup>) згідно з вимогами ГСТУ 42.10-02-96 "Води мінеральні лікувальні. Технічні умови".

Забруднення водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію – не антропогенний чинник, а радіоліз води. Проте це твердження потребує додаткового вивчення в межах розвіданих родовищ

мінеральних підземних вод, де зафіксовано перевищення вмісту нітратів згідно з нормами чинного законодавства.

Можливе додаткове зростання кількості мінеральних радонових вод за рахунок збільшення часу роботи свердловин з 7 годин (як затверджено) до 8–9 годин на добу. Однак даний пункт потребує довищення.

Родовище має потенціал до збільшення експлуатаційних запасів за рахунок свердловини № 6-Р. У цьому випадку необхідно приділити додаткову увагу питанню щодо перевищення нітратів через процес радіолізу води.

Кількість експлуатаційних запасів мінеральних радонових вод на момент проведення досліджень (2004 р.) була обмежена свердловинами № 5, 10-Р. Відповідно до протоколу ДКЗ України від № 863 на підставі довідки про кондиції на мінеральні води свердловин № 5, 10-Р (видає ДК "УкрНДІМРтаК МОЗ України") за умов переривчастого водовідбору протягом 7 годин на добу, було затверджено балансові експлуатаційні запаси мінеральних радонових лікувальних підземних вод загальнодержавного значення у відкладах тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію, що придатні для використання в лікувальній практиці при зовнішньому застосуванні. У відсотковому значенні кількість експлуатаційних запасів можна збільшити майже вдвічі (рис. 1).

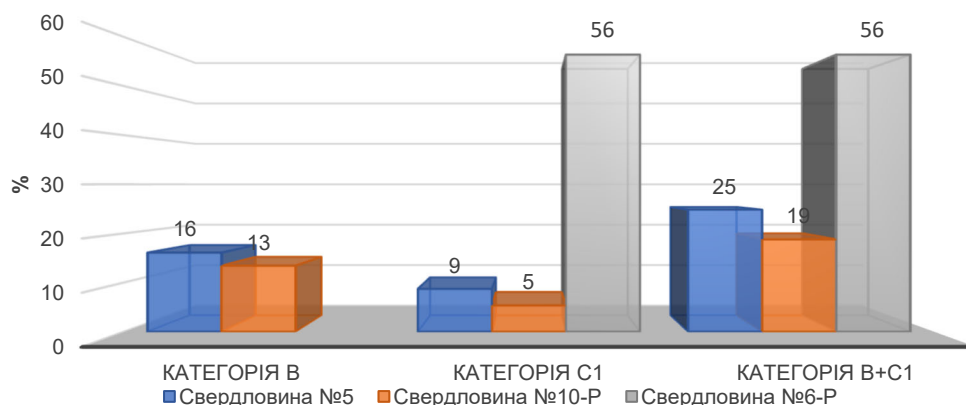


Рис. 1. Потенційні запаси ділянки "Курортна" Немирівського родовища мінеральних радонових вод у відсотковому вигляді

Як видно з результатів детального аналізу ділянки "Курортна" Немирівського родовища мінеральних радонових вод, потенціал до збільшення експлуатаційних запасів є навіть на вже розвіданих родовищах.

Родовище розкриває водоносний горизонт тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію та кори їх вивітрювання. Водозбагаченість порід залежить передусім від їх тріщинуватості. Ступінь тріщинуватості кристалічних докембрійських порід – це основний чинник, що сприяє накопиченню та циркуляції підземних вод, визначає їх водозбагаченість, зумовлює взаємозв'язок тріщинних вод між собою та гідравлічний зв'язок з іншими вищезалеглими водоносними горизонтами.

Відповідно до чинного законодавства радоновими вважаються підземні води, вміст лікувального компонента в яких перевищує або дорівнює 185 Бк/дм<sup>3</sup>. Згідно з мінеральні радонові води мають такі критерії за лікувальними властивостями із вмістом специфічних компонентів:

- дуже слаборадонові – 185–740 Бк/дм<sup>3</sup>;
- слаборадонові – 740–1480 Бк/дм<sup>3</sup>;
- середньорадонові – 1480–7400 Бк/дм<sup>3</sup>;
- високорадонові – >7400 Бк/дм<sup>3</sup>.

Таблиця 2

Критерії за лікувальними властивостями свердловин ділянки "Курортна" м. Немирів

| № свердловини                                                       | Вміст радону, Бк/дм <sup>3</sup> | ГДК, Бк/дм <sup>3</sup> |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Ділянка "Курортна" Немирівського родовища мінеральних радонових вод |                                  |                         |
| 5                                                                   | 185–740                          | Дуже слаборадонові      |
| 10-Р                                                                |                                  |                         |

**Внесок авторів:** Сергій Шаріков – концептуалізація, формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка); Дмитро Чомко – валідація даних, написання (перегляд і редагування).

#### Список використаних джерел

- Бабов, К., Золоторьова, Т., & Насібуплін Б. (2008). *Порядок здійснення медико-біологічної оцінки якості та цінності природних лікувальних ресурсів*. КІМ.
- Бузинний, М., & Михайлова, Л. (2022). Узагальнені дані 20-річного моніторингу радону-222 у питній воді України. *Ядерна та радіаційна безпека*, 4(96), 29–38.
- ГСТУ 42.10-02-96. (1996). *Води мінеральні лікувальні. Технічні умови*.
- Мілюхін, М., & Шеремета, А. (2005). *Звіт про результати детальної розвідки з підрахунком експлуатаційних запасів мінеральних радонових вод Немирівського родовища (санаторій "Авангард"), Вінницької області проведеної в 1997–2002 рр.*
- Нікіпелова, О., Кисилевська, А., & Солодова. (2010). Гігієнічні нормативи щодо мінеральної лікувально-профілактичної води та лікувальної води – каталізатор розвитку їх стандартизації в Україні. *Харчова наука та технологія*, 2, 26–29.



Seid, A., Turhan, Ş., Bakir, T., & Kurnaz, A. (2023). Radon concentration of different brands of bottled natural mineral water commercially sold in Turkey and radiological risk assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(19), 1–13.

#### References

Babov, K., Zolotareva, T., & Nasibullin B. (2008). *Procedure for conducting medical and biological assessment of the quality and value of natural medicinal resources* [in Ukrainian].

Buzynnyi, M., & Mykhaylova, L. (2022). Summary of 20-year monitoring data of radon-222 in drinking water of Ukraine. *Nuclear and Radiation Safety*, 4(96), 29–38 [in Ukrainian].

Milyukhin, M., & Sheremeta, A. (2005). *Report on the results of detailed exploration with the calculation of operational reserves of mineral radon*

*waters of the Nemyriv deposit (sanatorium "Avangard"), Vinnytsia region, carried out in 1997–2002* [in Ukrainian].

Nikipelova, O., Kysylevska, A., & Solodova. (2010). Hygienic standards for mineral therapeutic and prophylactic water and medicinal water – a catalyst for the development of their standardization in Ukraine. *Food Science and Technology*, 2, 26–29 [in Ukrainian].

Seid, A., Turhan, Ş., Bakir, T., & Kurnaz, A. (2023). Radon concentration of different brands of bottled natural mineral water commercially sold in Turkey and radiological risk assessment. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(19), 1–13.

SSU 42.10-02-96. (1996). *Medical mineral waters. Technical conditions* [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 11.04.25

Прорецензовано / Revised: 21.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Sergii SHARIKOV, PhD Student

ORCID ID: 0009-0009-2847-2820

e-mail: s.sharikov@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Dmitro CHOMKO, PhD (Geol.), Assoc. Prof.

Head of the Department Hydrogeology and Engineering Geology

ORCID ID: 0000-0001-8454-5531

e-mail: chomko@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## PROSPECTS FOR INCREASING THE RESOURCE POTENTIAL OF MINERAL RADON WATERS IN THE VINNYTSKA REGION

**Background.** Prospects for increasing the mineral resource base of Ukraine are one of the main strategies for the development of our country today and in the post-war period.

At present, increasing the number of total approved reserves of mineral radon waters by opening new deposits is not a priority component, as it is costly. However, a detailed analysis of the possible increase in the number of operational reserves based on already explored deposits is promising.

This work refers to one of the components of the plan for achieving a common better future approved by the members of the United Nations in 2015 (17 sustainable development goals). The material presented in the article refers to point 3, namely – Ensuring a healthy lifestyle and promoting well-being for all at any age.

Radon mineral waters are balneological underground waters that have healing properties when used internally or externally. An important factor during the exploitation of such groundwater is their compliance with the conditions, i.e. the established maximum permissible concentrations (hereinafter referred to as MPC), which are in force at the present time.

At different periods of time, various stages of exploration of mineral radon waters were carried out within the Vinnytsia region, from exploratory work to detailed exploration. Therefore, a detailed analysis of existing deposits, an assessment of the prospects for expanding or increasing operational reserves, and determining the resource potential of institutions specializing in radon groundwater are important tasks.

**Methods.** This study was conducted on the basis of a detailed analysis of stock materials and a comparison of the actual results of the content of radon mineral waters with other deposits within the Vinnytsia region.

**Results.** As a result of the conducted studies, it was found that within the Resort area, which is located in the city of Nemyriv, there is a potential to increase the operational reserves of mineral radon waters. This statement is based on the analysis of data from the preliminary (1985) and detailed (2004) exploration.

**Conclusions.** Studies have shown that an increase in the operational reserves of mineral radon waters is possible due to the inactive (at the moment) operational well No.6-R. During a detailed assessment of operational reserves, this well was excluded from the calculation of reserves due to the excess of nitrate content ( $>65 \text{ mg/dm}^3$ ) according to the Industry Standard of Ukraine (GSTU) 42.10-02-96 "Medical mineral waters. Technical conditions". However, the increased nitrate content is not the result of contamination of the target aquifer, but is a consequence of water radiolysis. More detailed studies of this problem could lead to the improvement of the current regulatory requirements for mineral waters specifically for external use.

**Keywords:** radon, mineral radon groundwater, deposit, reserves, groundwater quality.

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 504.5:628.3:667.2(477.61-21Рyb)  
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.12>

Ніна МІХАЛКОВА, асп.  
ORCID ID: 0000-0001-9119-213X  
e-mail: [mikhalkovanini@gmail.com](mailto:mikhalkovanini@gmail.com)  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

Ігор УДАЛОВ, д-р геол. наук, проф.  
ORCID ID: 0000-0003-3844-6481  
e-mail: [igorudalov8@gmail.com](mailto:igorudalov8@gmail.com)  
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

## АНАЛІЗ ЧИННИКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ДЛЯ НАКОПИЧУВАЧА ТОВ "РУБІЖАНСЬКИЙ КРАСИТЕЛЬ"

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

**Вступ.** Присвячено чинникам екологічної небезпеки, спроможним негативно вплинути на стан накопичувача високомінералізованих стоків ТОВ "Рубіжанський Краситель". Актуальність роботи зумовлена наявними екологічними проблемами, що супроводжують довготривалу експлуатацію техногенного об'єкта.

**Методи.** У дослідженні використано аналіз наявної інформації про геолого-гідрогеологічні умови району та технічний стан об'єкта накопичення. Оцінка екологічних ризиків здійснювалася на основі літературних джерел, картографічних матеріалів і логічного аналізу впливу природних і техногенних чинників. З огляду на відсутність доступу до об'єкта, використано підхід умовного моделювання можливих сценаріїв впливу з урахуванням чинників небезпеки.

**Результати.** Основні чинники небезпеки, відповідно до їх походження, поділено на природні і техногенні. Встановлено, що вплив природних чинників небезпеки зумовлений особливостями території розміщення техногенного об'єкта та глобальними змінами клімату. Описано основні процеси, які становлять потенційну загрозу поширення речовин з накопичувача як з боку ендегенної природної складової (геологічної будови території, гідрогеологічних умов), так і екзогенної (кліматичних та гідрологічних умов). Зауважено, що розташування накопичувача в зоні впливу Північнодонецького насування сприяє поширенню речовин з накопичувача в геологічному середовищі (ГС). Зазначено, що стан споруд частково відображає прояви впливу певних чинників, проте подальша їх дія може спровокувати аварійну ситуацію на накопичувачі.

**Висновки.** Проаналізовані техногенні чинники небезпеки свідчать про низку несприятливих процесів, потенційна загроза яких пов'язана безпосередньо з порушенням умов експлуатації об'єкта. При цьому відзначено наявність ознак, які вказують на пошкодження споруд та комунікацій. Визначено, що саме військові чинники небезпеки, які належать до техногенних, мають нині найвищий ступінь імовірності руйнівного впливу на накопичувач. Зауважено, що перебування території під контролем сторонніх осіб, а саме – окупаційних сил, сформувало досить небезпечну ситуацію, враховуючи речовинний склад відходів. Більше того, ці обставини анулюють будь-які шляхи розв'язання існуючих екологічних проблем прилеглої території, унеможлижуючи доступ до об'єкта.

**Ключові слова:** чинник небезпеки, накопичувач відходів, забруднювальні речовини, міграція, навколишнє природне середовище, геологічне середовище, підземні води, ризики виникнення аварійної ситуації.

### Вступ

**Актуальність і постановка проблеми.** Наявність екологічних проблем в останні десятиліття є поширеним явищем для техногенно-навантажених регіонів України. Хоч сучасний курс країни загалом спрямований на збалансоване природокористування (збереження та відновлення природних екосистем, енергоефективність тощо), сформована протягом тривалого часу кризова екологічна ситуація залишається гострою проблемою. Особливо показово це спостерігається в місцях, які мають природну "схильність" до розвитку промисловості – наявність у надрах покладів корисних копалин. Досить часто саме в таких умовах у ХХ ст. виростали цілі промислові агломерації, що нині лишили по собі велику кількість небезпечних та аварійних техногенних об'єктів.

Відомо, що для промислових агломерацій однією з основних проблем є наявність техногенних об'єктів (відстійників, накопичувачів, звалищ відходів тощо). Їх проблема полягає в тому, що ці об'єкти є джерелом постійної екологічної небезпеки незалежно від того, перебувають вони в експлуатації чи є покинутими. Більше того, техногенні об'єкти піддаються впливу різних чинників, що провокує й активізує збільшення масштабу негативного впливу на навколишнє природне середовище (НПС).

Описана вище ситуація характерна для Лисичансько-Рубіжанської промислової агломерації, яка є частиною найбільшого вуглевидобувного регіону України – Донбасу. У певному сенсі наявність товщ вугілля визначила майбутній інтенсивний техногенний вплив на цій території. Тому після становлення основоположної для даного

регіону вугільної промисловості тут сформувалась потужна поліцентрична промислова агломерація. Як наслідок – тривале техногенне навантаження зумовило комплекс екологічних проблем як загалом для НПС, так і для ГС. Однак акцентування на проблемах та ризиках, пов'язаних зі станом ГС, є пріоритетним через його здатність затримувати забруднювальні речовини в підземній товщі (у ґрунтах, підземних водах тощо), а також через складність геолого-тектонічної будови, що призводить до складних різнопланових наслідків.

ГС в межах Лисичансько-Рубіжанської промислової агломерації досить неоднорідне і складне – тектонічна будова Донбасу виділила природні і промислові райони (Бондарчук, 1949). Умовна лінія розподілу проходить по р. Сіверський Донець: на правобережжі горбиста рівнина з виходами карбону на денну поверхню сформували підґрунтя для вуглевидобувної діяльності; лівобережжя – це терасована рівнина, складена потужною товщею верхньокрейдяних та четвертинних відкладів у верхній частині розрізу. Тому лівобережжя являє собою велику концентрацію техногенних об'єктів, а також водозаборів підземних вод.

На прикладі ТОВ "Рубіжанський Краситель" (далі – "Краситель"), що розташоване на лівобережжі, спостерігається результат такої концентрації. Так, внаслідок багаторічної діяльності підприємства відбулись негативні зміни в ГС (забруднення, суфозія та ін.) (Ніколаєва, 2020; Міхалкова, Кононенко, & Удалов, 2022; Яковлев, Сплодитель, & Чумаченко, 2021; Соколов, Удалов, & Кононенко, 2021). Наслідки техногенного впливу

особливо показово відображені в підземній гідросфері. Через забруднення підземних вод на даній території ліквідовано водозабори Заводський, Катерининський, Приканалний та переключено лише на технічне використання забрудненої води Лівнівський, причому щодо останнього вже складено проєкт ліквідаційного тампонажу.

Накопичувач "Красителя" і на сьогодні є джерелом забруднення ГС, незважаючи на факт ліквідації підприємства (Ніколаєва, 2020; Стан ... щорічник, 2021). Тому важливо обґрунтувати та класифікувати основні чинники небезпеки для накопичувача, що дасть змогу виділити основні ризики та найактуальніші проблеми техногенного об'єкта.

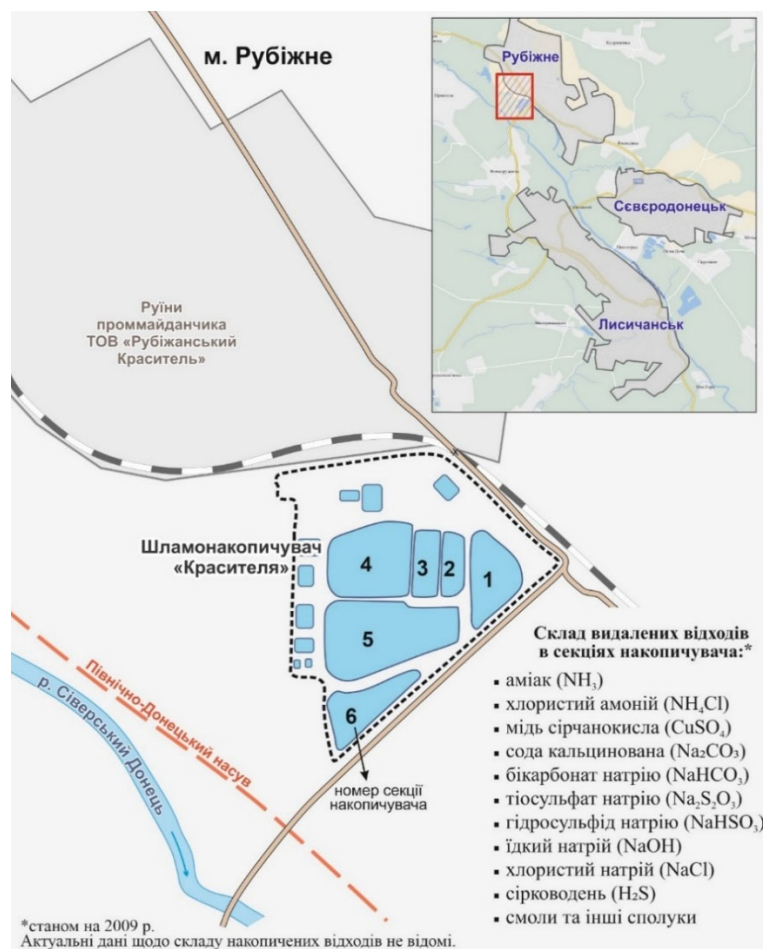
**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Існування промислових відходів (у вигляді накопичувачів чи звалищ) як джерело забруднення природного середовища є досить поширеним предметом дослідження в багатьох регіонах світу. Такі дослідження здебільшого проводяться з метою визначення основних напрямків і масштабів міграції забруднювальних речовин. Загалом нагромадження промислових відходів характерне для багатьох країн через використання лінійної економічної моделі в минулому. Нині світова спільнота впроваджує концепцію збереження ресурсів та екологічного природокористування, тому для багатьох розвинутих країн проблема існування техногенних об'єктів, що забруднюють природне середовище, є відлунням минулого. Хоч, наприклад, для країн ЄС, які давно впроваджують ефективні методи управління небезпечними відходами,

проблема існування і навіть зростання кількості відходів все ще є актуальною (EU actions ... waste, 2023).

Загалом наявні погляди щодо існування промислових відходів як джерела забруднення зводяться до кількох варіацій розв'язання проблеми: очищення, нейтралізація, утилізація відходів та загальна екологічна реабілітація території; переробка і повторне використання задля перетворення відходів у ресурс; перекваліфікація і повторна функціональність об'єкта тощо (Del Giudice et al., 2020; Santucci et al., 2018; Srivastava et al., 2023).

Проблема накопичувача "Красителя" фрагментарно висвітлювалась у деяких роботах (Назаренко, & Зайцева, 2014; Мішукова, 2018). Досить детально проаналізовано проблему цього техногенного об'єкта в межах проекту Координатора проектів ОБСЄ в Україні "Зміцнення спроможності для моніторингу та управління водними ресурсами на сході України" (Ніколаєва, 2020). Автори надали рекомендації щодо накопичувача: нейтралізація відходів, належне закриття секцій, що не експлуатуються, та подальша рекультивация порушених земель.

Відомо, що накопичував Рубіжанський розташований на околиці м. Рубіжне Луганської області (рис. 1). Об'єкт в 2009 р. передано від підприємства хімічної галузі – "Краситель" на баланс підприємства житлово-комунального господарства (ЖКГ) – КП "Рубіжанське виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства" Рубіжанської міської ради (далі – КП "РВУВК") (Ніколаєва, 2020). Тому деякі секції використовуються для відходів і досі.



**Рис. 1. Оглядюва карта-схема накопичувача "Красителя"**  
(зверху зображено розміщення об'єкта в Лисичансько-Рубіжанській промисловій агломерації)



Як об'єкт небезпеки досліджуваний накопичувач складається з шести секцій: №№ 2, 5, 6 – не діють, №№ 1, 3, 4 – діють, водночас різні секції перебувають в експлуатації 45–81 рік. Обсяг видалених відходів на 01.01.2009 – 1 757,903 тис. м<sup>3</sup>. На сьогодні невідомі фактичний загальний обсяг, фізичні й хімічні властивості накопичених відходів. Наявні дані 10-річної давнини не відображають поточний стан через їх багаторічне змішування між собою та поповнення іншими видами відходів КП "РВУВКГ" (мул та пісок) (Ніколаєва, 2020). Ситуацію суттєво ускладнює ведення бойових дій в даній місцевості та тимчасова окупація території розташування накопичувача. Тому дослідження безпосередньо на території об'єкта не можуть бути здійснені найближчим часом.

**Виділення розв'язаних раніше частин загальної проблеми.** Враховуючи, що Лисичансько-Рубіжанська промислова агломерація, до якої належить досліджувана територія, є прикладом регіону з техногенно переважаним впливом на НПС взагалі і ГС зокрема, автори вважали за необхідне в цій статті зробити спробу визначити і систематизувати чинники екологічної небезпеки для НПС, пов'язані з таким складним техногенним об'єктом, як накопичувач заводу "Краситель". Його можна розглядати як типовий приклад для всього Донбасу, враховуючи кількість промислових підприємств на цій території, які працювали десятки років і комплексно впливали на екологічний стан НПС як під час своєї промислової діяльності, так і після закриття (цей термін на сьогодні сягає майже 20 років).

**Метою статті** є визначення основних чинників небезпеки, що здатні спровокувати виникнення аварійної ситуації на накопичувачі. Основним завданням водночас було виконати аналіз обраних чинників, враховуючи особливості території розміщення техногенного об'єкта та відходів, з їх потенційною небезпекою для НПС.

### Результати

"Краситель" був одним із найбільших підприємств Лисичансько-Рубіжанської промислової агломерації і здійснював виробничу діяльність майже століття (засноване в 1915 р.). Місце розташування підприємства зумовлене наявністю джерел сировини, палива та води, що є основним принципом розміщення промислових об'єктів (Іщук, & Гладкий, 2011). Наявність основних необхідних ресурсів, утворених внаслідок складних геолого-тектонічних процесів, дала змогу сформулювати на цій місцевості велику агломерацію.

Зупинімося детальніше на геолого-тектонічних особливостях прилеглої території, адже регіон має досить складну будову.

В геоструктурному плані територія агломерації розташована на стику кількох геологічних регіонів. З північного заходу на відстані кількох десятків кілометрів розташоване південно-східне закінчення центрального грабену Дніпровсько-Донецької западини, на північний схід – південний схил Воронезької антеклізи, тобто Старобільсько-Міллерівська монокліналь. З південного заходу прилягає складчастий Донбас, обмежений Північнодонецьким насувом, що простежується вздовж правого берега річки Сіверський Донець.

Північнодонецький насув є регіональним розривом, тому по обидві сторони від нього склались різні тектонічні умови. З південного заходу (між Північнодонецьким і Мар'їнським насувами) розташовується своєрідна підзона крайових брахіскладок – брахіантікліналей, що чергуються з брахісинкліналями. Ця підзона належить до області суцільної складчастості. На північний схід від Північнодонецького насуву по південному краю

платформного схилу розташовуються уривчасті складки у вигляді ланцюжка куполів, розділених нескладчастими інтервалами. Купольні складки обмежують підзону крайових брахіскладок з півночі та Старобільсько-Міллерівську монокліналь з півдня, будучи проміжною зоною між складчастим Донбасом та схилом платформи.

Тобто Північнодонецький насув являє собою регіональне порушення, яке за генетичною сутністю є насуванням складчастого Донбасу на платформний схил Воронезького кристалічного масиву. Тому в рельєфі території спостерігаються різкі відмінності в тісній залежності від літологічного складу порід: межа умовно проходить по р. Сіверський Донець.

Правобережжя р. Сіверський Донець являє собою височину з окремими вершинами до 205–215 м (абс. відм.), у склепіннях яких відслонюються кам'яновугільні відклади. У напрямку до р. Сіверський Донець ця височина обривається й утворює правий крутий і високий схил долини р. Сіверський Донець, порізаний великою кількістю глибоких ярів і балок. Залягання порід карбону у склепінневих частинах з виходами вугілля на поверхню зумовило появу на правобережжі вуглевидобувної діяльності.

Лівобережна частина території різко відрізняється від правобережжя і являє собою рівнинну низовину, що простягається вздовж русла р. Сіверський Донець смугою до 15–20 км. Заплавна тераса тягнеться вздовж річки суцільною смугою завширшки від 1,5 до 3,5 км. Рельєф заплави складний. У прирусловій частині накопичуються наноси, які утворюють прирусловий вал. У середній частині заплави відзначається велика кількість стариць та озер, пов'язаних протоками з р. Сіверський Донець. Абсолютні відмітки її поверхні становлять 40–50 м.

Вище на схилі долини розташовується надзаплавна тераса, ширина якої сягає до 3 км. Ці дві тераси є нижніми в долині річки і становлять групу акумулятивних алювіальних терас.

Північніше на лівобережжі розташовуються більш давні високі тераси, що поступово переходять водороздільні плато.

Третя за рахунком тераса має поверхню з відмітками близько 100–120 м. Всі три тераси складені піщано-суглинистими та піщаними відкладами, які підстилаються мергельно-крейдяними породами крейдової системи. Водоносний горизонт мергельно-крейдяної товщі в межах регіону містить напірні води, що відповідають вимогам для господарсько-питного водокористування. У зв'язку із цим саме води мергельно-крейдяного водоносного горизонту (МКВГ) стали основним джерелом водопостачання для місцевих потреб.

Отже, структурно-тектонічні та геологічні умови території дослідження створили передумови для чіткого розподілу майбутнього техногенного втручання і користування надрами. Так, виходи вугілля зумовили початок промислового вуглевидобутку на правобережжі р. Сіверський Донець. На базі вугільної виникли підприємства хімічної, машинобудівної та інших галузей промисловості як на правобережжі, так і на лівому березі. Тому для потреб великої кількості підприємств та сформованих населених пунктів було споруджено водозабори для експлуатації запасів прісних підземних вод з МКВГ. Відповідно до цього можна стверджувати, що обсяг використання ГС як мінерально-сировинної бази та основи для спорудження будівель і споруд досить високий для даного регіону.

Використовуючи ГС для своїх потреб, людство вносить у нього великі зміни, переважно негативні, порушуючи й руйнує його (Свинко, & Сивий, 2003). Така тенденція

властива і Лисичансько-Рубіжанській агломерації, враховуючи різноманітність промислових підприємств. Так, стрімкий розвиток промислової агломерації з часом спричинив комплекс негативних наслідків як для ГС загалом, так і для складових НПС (поверхневі води, атмосферне повітря). За останні 5–7 років обсяги виробництва є вкрай малими (як і кількість підприємств, що працюють), але формування несприятливого впливу триває.

В даній роботі пропонується проаналізувати саме накопичувач ліквідованого заводу "Краситель" як приклад підприємства, що тривалий час не працює, але через відсутність належної рекультивації території досі є джерелом забруднення ГС. Для Лисичансько-Рубіжанської агломерації кількість ліквідованих та, меншою мірою, законсервованих промислових підприємств з кожним десятиліттям стрімко зростає. Тому "Краситель" розглядається в контексті типового для цього регіону прикладу, коли підприємство ліквідовано нерационально (виробничі споруди знесені, а відходи залишаються неутілізованими та у відкритому доступі для сторонніх осіб).

Територія розташування промислового підприємства "Краситель" в геоморфологічному плані приурочена до лівобережної частини заплави та перших надзаплавних терас р. Сіверський Донець. Проммайданчик Красителя розміщений на відстані ~1,5 км від регіонального порушення – Північнодонецького насуву, сам накопичувач

ближче (~0,5–0,7 км). Однією з головних характеристик Північнодонецького насуву є наявність зони дроблення порід, яка розташована на відстані 1,5–3 км навкруги нього. Ця зона має змінні фільтраційні властивості і може транспортувати забруднення на великі відстані (Міхалкова, & Удалов, 2024).

Розташування накопичувача в зоні впливу Північнодонецького насуву пояснює деякі процеси в ГС, що зумовлюють поширення забруднювальних речовин вище по потоку до водозаборів. Так, ще в минулому столітті при дослідженні відстежувався потік, який паралельний до Північнодонецького насуву і йде до ділянки оз. Довге і далі в напрямку до Володинського водозабору (рис. 2). Існування цього потоку може бути пов'язане, по-перше, з підвищеною тріщинуватістю порід у зоні Північнодонецького насуву і, по-друге, з "підпираючим" впливом менш проникних порід карбону за насумом; крім того, відмітки рівня підземних вод у районі накопичувача приблизно на 5 м вищі, ніж на Володинському водозаборі. Тому ще в 1980-х р. фіксувалось забруднення питних вод у деяких свердловинах водозабору, було вжито заходів щодо усунення цієї проблеми. Варто зазначити, що на той час відбувалась інтенсивна виробнича діяльність підприємства, тому забруднення йшло в тому числі і від проммайданчика (втрати з комунікацій).

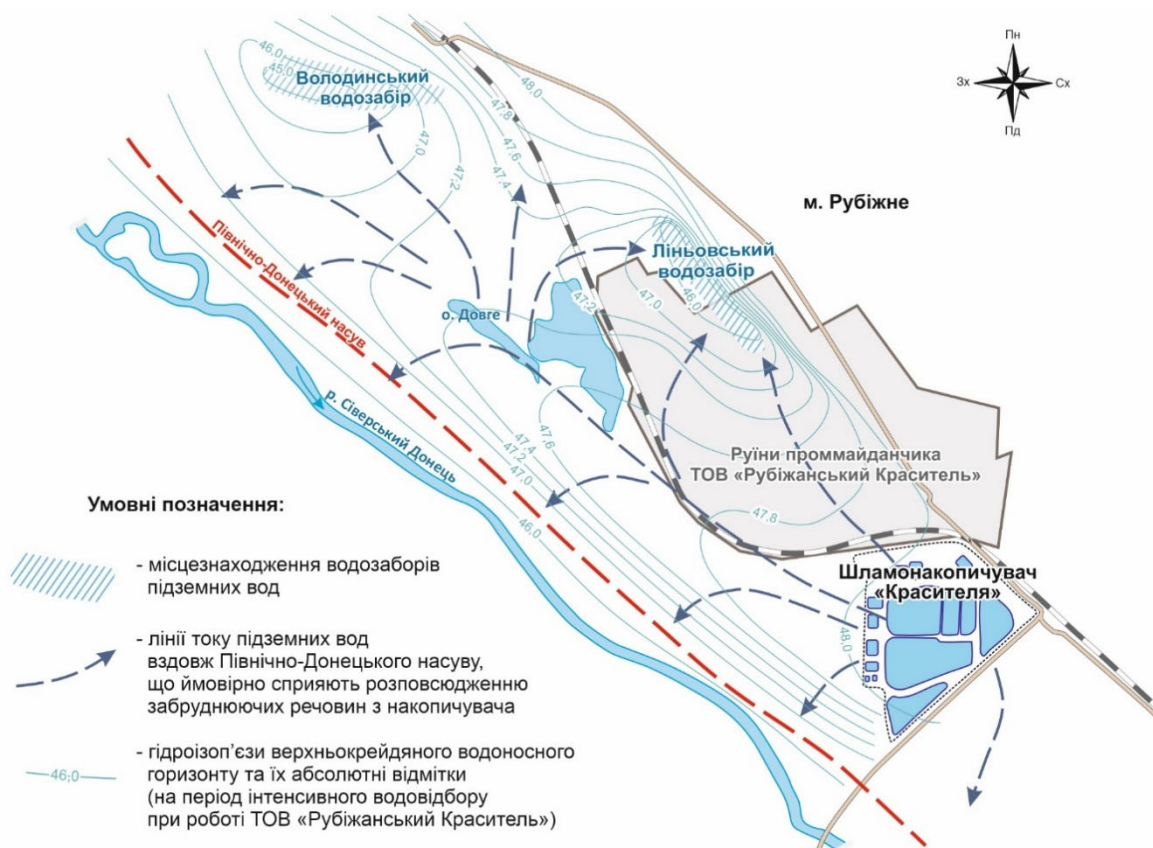


Рис. 2. Карта-схема напрямків руху підземних вод верхньокрейдяного водоносного горизонту в районі накопичувача ТОВ "Рубіжанський Краситель"

У сьогоденнішніх реаліях основну небезпеку становить накопичувач відходів "Красителя". Багаторічний термін експлуатації цього об'єкта безперечно вплинув на стан споруд, тому дії певних чинників можуть спровокувати аварійну ситуацію. Міграція забруднювальних речовин

при цьому може бути спрямована не тільки напрямком до річки, а й вище по потоку – до водозабору.

Тому важливо проаналізувати основні чинники небезпеки для накопичувача, й визначити ті, що несуть найбільші ризики для стійкості об'єкта.

Основні чинники небезпеки розподілено на природні та техногенні, відповідно до характеру їх виникнення (рис. 3). Очевидно, що вплив кожної складової цих

чинників зводиться до ймовірності поширення забруднювальних речовин за межі секцій накопичувача. Тому розглянемо їх детально.



Рис. 3. Основні чинники екологічної небезпеки для накопичувача ТОВ "Рубіжанський Краситель"

**Природні чинники небезпеки** можуть здійснювати несприятливий вплив непередбачуваного масштабу, незважаючи на високий рівень освоєння природи людством. Зрозуміло, що перед розміщенням об'єкта підвищеної небезпеки проводиться ретельне дослідження прилеглої території. Мета таких досліджень – виявлення особливостей території (геологічних, тектонічних тощо), визначення наявних ризиків зі сторони НПС та обрання максимально безпечного місця для розміщення об'єкта. Проте природні чинники небезпеки створюють ризики виникнення аварійних ситуацій і на сьогодні, коли накопичувач Красителя проіснував кілька десятиліть.

Природні чинники небезпеки поділено за підгрупами: кліматичні умови, гідрологічні умови, геологічна будова та гідрогеологічні умови. Їх визначено залежно від місця розташування об'єкта.

**Кліматичні чинники небезпеки** пов'язані переважно з посиленням непередбачуваності погодних умов. Прилегла до накопичувача територія належить до степової зони з помірно теплим кліматом. Однак стрімка зміна клімату, що спостерігається протягом останніх десятиліть, відображається в дещо нетипових для даної місцевості погодних умовах.

Нині спостерігається тенденція до збільшення інтенсивності сильних злив, граду, гроз, шквалів; різка зміна погоди та різкі перепади температур; збільшення кількості і тривалості спекотних періодів та посилення пожежної небезпеки (Іванюта та ін., 2020). Тому посилення впливу кліматичних чинників небезпеки збільшує ризики виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з накопичувачем.

Наприклад, більша інтенсивність опадів може призвести до переповнення ємності секцій накопичувача, розмиву їх дамб. Високі літні температури роками сприяють випаровуванню забруднювальних речовин із дзеркала накопичувачів в атмосферне повітря (Ніколаєва, 2020). Штормові вітри і шквали призводять до

виносу пиловатих та піщаних фракцій із вмісту накопичувача (Міхалкова, & Кононенко, 2024).

Різкі перепади температур, особливо взимку, активізують процеси фізичного вивітрювання. Як механізм руйнування поверхні мінералів, вивітрювання послаблює породи і створює загрозу стійкості споруд. Особливу небезпеку має різкий перехід температури через 0 °C, що у свою чергу активізує руйнування бортиків накопичувача.

Зрозуміло, що з кожним наступним десятиліттям непередбачуваність погодних умов зростатиме. У зв'язку зі зміною клімату, яка помітно виражена вже в сучасних умовах, спостерігатиметься посилення впливу кліматичних чинників небезпеки на накопичувач.

**Гідрологічні чинники небезпеки** пов'язані з надлишком вологи внаслідок різноманітних гідрологічних явищ (повені, селі тощо).

Накопичувач розташований досить близько до р. Сіверський Донець (0,7–1,4 км), на пологому лівобережжі (Ніколаєва, 2020). Таке розташування створює передумови ризику підтоплення найближчих до річки секцій накопичувача. Причиною цього можуть бути такі явища та процеси, як повені, паводки, сніготанення тощо. В такому випадку небезпека полягає в змішуванні поверхневих "чистих" вод з небезпечними речовинами, що містяться в секції, і подальшому забрудненні території такою водою.

Варто зауважити ризик формування такого гідрологічного явища, як селевий потік. Враховуючи місцями неналежний стан дамб накопичувача, у разі інтенсивних дощів існує загроза виникнення селевого потоку в районі певної секції (Ніколаєва, 2020). Водночас можливе забруднення території як локально – в 100–150 м біля накопичувача, так і більш масштабно – потрапляння забруднених речовин до р. Сіверський Донець (за умов повені).

**Геологічні чинники небезпеки** пов'язані загалом із порушенням стійкості гірських порід. У районі накопичувача це загроза виникнення небезпечних геологічних



явищ у приповерхневій частині літосфери (наприклад, зсуви, карстові процеси, просадки ґрунту та ін.). Причому прояви деяких процесів спостерігаються вже зараз у невеликих масштабах. Так, за даними звіту (Ніколаєва, 2020), на дамбах секцій Рубіжанського накопичувача спостерігаються ознаки зсувних процесів. Хоч самі дамби достатньо широкі (орієнтовно 4 м), але з часом все більше зазнають несприятливих геологічних (екзогенних) процесів через недостатній технічний догляд за станом накопичувача.

Варто зазначити несприятливий вплив з боку сейсмічності. Територія розташування накопичувача належить до сейсмічно небезпечного регіону із значенням фонові сейсмічної інтенсивності 5 балів згідно з ДБН В.1.1-12:2014 (Будівництво..., 2014). Накопичувач є постійною гідротехнічною спорудою (згідно з ДБН В.2.4-3:2010), тож вочевидь під час проектування було враховано зміни природних умов, які можуть привести до розвитку та активізації негативних фізико-геологічних, геодинамічних процесів у основі споруди (Гідротехнічні..., 2011). Проте людський фактор корегує сейсмічну стабільність місцевості. Це пов'язано з наявністю вугільних шахт, розташованих в 5–10 км (що відповідає розмірам середнього шахтного поля), які закриті шляхом припинення водовідливу. Як відомо, "мокра" консервація шахт супроводжується комплексом різноманітних наслідків (інженерно-геологічних, гідрогеологічних та ін.) (Удалов, 2016; Бузило, & Павличенко, 2014; Рудько, & Плахотній, 2015; Удалов, & Кононенко, 2016). Тому зростають ризики активізації сейсмічності та появи локальних землетрусів – підземних гідромеханічних поштовхів (Рудько, & Яковлев, 2020). Такі поштовхи становлять загрозу стійкості гідротехнічних споруд накопичувача. В цьому випадку геологічний чинник безпеки має техногенне підґрунтя.

**Гідрогеологічні чинники безпеки** пов'язані переважно з ризиками потрапляння небезпечних речовин із накопичувача до водоносних горизонтів. Водопостачання м. Рубіжного та прилеглих населених пунктів здійснюється за рахунок експлуатації водозаборів підземних вод. Причому верхньокрейдяний водоносний горизонт досить незахищений, хоча є основним експлуатаційним горизонтом.

У зв'язку з гідрогеологічними умовами, що склались у районі розміщення накопичувача, існує постійна загроза забруднення підземних вод з поверхні. Між алювіальним і верхньокрейдяним водоносними горизонтами залягає шар глинистих мергелів (елювій), який є слабопроникним і розділяє ці два горизонти. Елювій місцями відсутній, тож існує взаємозв'язок алювіального і верхньокрейдяного водоносних горизонтів. У зв'язку з багаторічною експлуатацією накопичувача (45–81 рік) існує висока ймовірність втрати його гідроізоляційних властивостей. Таким чином, наслідком є просочування небезпечних речовин із накопичувача через ґрунти його основи до незахищених водоносних горизонтів (Ніколаєва, 2020).

Іншим гідрогеологічним чинником безпеки є формування депресійних лійок внаслідок довготривалих і інтенсивних експлуатаційних та виробничих відкачок підземних вод (Ніколаєва, 2020). При утворенні лійки в районі розташування накопичувача існує ймовірність підтягування небезпечних речовин при їх інфільтрації з поверхні.

У випадку, коли забір підземних вод не компенсується інфільтрацією атмосферних опадів і утворюється депресійна лійка, спостерігається зниження рівня підземних вод. При цьому зростають ризики просідання ґрунтів, руйнування споруд, комунікацій та інших несприятливих наслідків.

Але загалом формування депресійних лійок як чинник безпеки саме для накопичувача нині не є очікуваним. По-перше, рівень виробничих потреб у водозабезпеченні багатократно знизився через ліквідацію підприємства "Краситель". Тому забір підземних вод не здійснюється у великих масштабах у районі розміщення проммайданчиків "Красителя" та накопичувача. По-друге, водозабори м. Рубіжне за місцем розташування можна визначити як прируслові. Очевидно, що прируслові водозабори підземних вод найбільш забезпечені живленням і, по суті, забирають воду з річки, понижуючи тим самим її водоносність.

**Техногенні чинники безпеки** зумовлені результатами інженерної діяльності людства в минулому часі, а також сучасним техногенним впливом. Вони характеризуються здебільшого швидшими наочними проявами наслідків порівняно з природними чинниками.

Техногенні чинники безпеки поділяються на внутрішні, зовнішні та військові.

**Внутрішні чинники безпеки** пов'язані безпосередньо з експлуатацією накопичувача, а саме із вмісними речовинами секцій накопичувача. До таких чинників відносять наявність у відходах небезпечних речовин та порушення умов експлуатації накопичувача.

**Наявність у відходах небезпечних речовин** зумовлена специфічністю і різноманітністю виробництва колишнього хімічного підприємства "Краситель". Нині секції різною мірою наповнені відходами, які містять небезпечні (токсичні) речовини. Деякі з секцій частково або повністю осушені під впливом кліматичних чинників.

У складі видалених відходів 14 років тому містились такі небезпечні речовини, як: аміак, хлористий амоній, мідь сірчаною кислотою, сода кальцинована, бікарбонат натрію, тіосульфат натрію, гідросульфід натрію, їдкий натрій, хлористий натрій, сірководень, смоли та інші органічні та неорганічні сполуки (Ніколаєва, 2020). Звичайно, певна кількість речовини вже випарилась, забруднюючи при цьому атмосферне повітря. Проте такий речовинний склад становить загрозу забруднення прилеглої місцевості за умови порушення герметичності секцій.

**Порушення умов експлуатації накопичувача** припускає деякі потенційні загрози з боку відходів, що є в секціях. Зрозуміло, що специфічний склад відходів передбачав розміщення їх по окремих секціях. Але ймовірність змішування речовин, які повинні зберігатися окремо, зростає із ступенем погіршення ізоляційних властивостей споруд. Процес змішування таких відходів може спровокувати хімічні реакції між речовинами, внаслідок чого щонайменший негативний вплив – це забруднення атмосферного повітря при випаровуванні з поверхні. В цьому разі існує ймовірність переповнення ємності накопичувача (окремої секції), що спричинить більш масштабні наслідки, особливо за наявності водночас інтенсивних паводків чи сніготанення.

**Зовнішні чинники безпеки** також пов'язані з експлуатацією накопичувача, але стосуються стану його споруд. Прикладом таких чинників можуть бути: знос трубопроводів, нестійкість огорожувальних конструкцій, порушення ізоляції бортів та днища тощо.

Як вже було зазначено вище, багаторічний термін експлуатації об'єкта та відсутність належного технічного обслуговування протягом останніх десятиліть призвели до появи комплексу негативних процесів на території накопичувача. Як наслідок – нині має місце знос конструкцій і трубопроводів. Тому на території накопичувача спостерігаються накопичення рідин (відходів) у невідведених для цього місцях.

За зовнішніми ознаками загальний стан накопичувача можна визначити як занедбаний. Нестійкість огорожувальних конструкцій подекуди виражена у вигляді вилучення матеріалу дамб, зсувних процесів на дамбах тощо (Ніколаєва, 2020). Ймовірна втрата ізоляційних властивостей споруд сприяє поширенню забруднювальних речовин за межі секцій накопичувача через просочування до ґрунтових вод. Очевидною є загальна виснаженість стану накопичувача через великий термін експлуатації з недостатнім рівнем технічного обслуговування, а також через дії сторонніх осіб на цій території (Міхалкова, & Удалов, 2024).

Таким чином, внаслідок описаних вище процесів можна вважати, що наявність інфільтрації забруднювальних речовин через днище в підземні води зводить нанівець сенс гідроізоляційного екрана накопичувача.

**Військові чинники небезпеки** зумовлені веденням військових дій у регіоні протягом останніх 10 років. Сутність таких чинників зводиться до трьох основних процесів: обстрілів з різного озброєння, мінування території та облаштування оборонних споруд.

Незалежно від типу обстрілів (артилерійський, ракетний, стрілецький тощо), влучання на територію накопичувача безумовно мають руйнівний характер для споруд. Як результат – імовірні порушення цілісності резервуарів накопичувача та їх огорожувальних конструкцій. Тобто обстріли можуть призводити як мінімум до розкидання небезпечних для НПС речовин на десятки метрів від місця зберігання. В гіршому випадку такий вплив має перспективу витоків речовин з ємкостей накопичувача, що спричинить їх швидку міграцію, в тому числі і до підземних вод (Міхалкова, & Кононенко, 2022). Обстріли здатні спровокувати пожежі на секціях, які нині повністю або частково осушені, у такий спосіб забруднюючи атмосферне повітря небезпечними речовинами.

Мінування території накопичувача формує потенційну загрозу детонації цих мін у подальшому і, відповідно, порушення цілісності або руйнування бортів секцій. Такі ж наслідки можуть бути в разі облаштування оборонних споруд на території накопичувача (наприклад, широкі ділянки між секціями).

Нині зберігається висока вірогідність впливу військових чинників небезпеки на території накопичувача у зв'язку із веденням активних військових дій. З травня 2022 р. м. Рубіжне та його околиці тимчасово окуповані. Район розташування накопичувача неодноразово перебував під обстрілами, що підтверджують супутникові знімки. Так, на карті Google зображено хаотично розташовані вирви різного діаметру безпосередньо на території накопичувача. Вони відображають сліди влучань боєприпасів, що є підставою стверджувати про очевидну наявність наслідків для споруд та НПС (як мінімум, розкидання речовин з ємності накопичувача, вібраційне навантаження на споруди тощо) (Міхалкова, & Удалов, 2024).

Таким чином, розглянуті вище природні і техногенні чинники екологічної небезпеки створюють потенційні ризики виникнення аварійних ситуацій, пов'язаних з накопичувачем. Загалом вони зводяться до таких сценаріїв розвитку ситуацій відповідно до напрямку поширення забруднення:

- пошкодження суцільності дамби → вилив вмісту накопичувача в НПС з подальшою міграцією небезпечних сполук до ґрунтів, поверхневих та підземних вод;
- порушення ізоляції днища → просочування небезпечних речовин, що містяться у складі відходів, до підземних вод;
- вибухи, пожежі на накопичувачі → потрапляння до атмосферного повітря великої кількості небезпечних речовин.

Звичайно, є вірогідність поєднання сценаріїв аварійних ситуацій через складні обставини на території накопичувача. Такі поєднання можуть бути внаслідок впливу як кількох чинників небезпеки, так і одного (наприклад, військових дій).

В сучасних умовах саме техногенні чинники небезпеки зумовлюють найбільшу вірогідність виникнення аварійних ситуацій на накопичувачі. Насамперед це пов'язано з доступом сторонніх осіб на його територію. Через відсутність належного контролю протягом певного періоду часу на території накопичувача здійснювались неправомірні дії сторонніх осіб щодо об'єкта. Внаслідок цього зафіксовано несанкціоноване вилучення матеріалу дамб та проведення невідомих технологічних робіт на ділянках накопичувача (Ніколаєва, 2020). Отже, дії сторонніх осіб можуть спровокувати порушення цілісності споруд та, як наслідок, потрапляння відходів у НПС.

У разі відсутності прямої загрози виникнення аварійної ситуації внаслідок вже наявних пошкоджень дамби, такі ділянки стають "вразливими" місцями для накопичувача. Тобто в разі інтенсивного впливу чинника небезпеки (наприклад, природного – підтоплення, довготривалих опадів тощо) існує висока ймовірність прориву дамби саме в районі пошкодженої ділянки. Своєчасне виявлення таких ділянок та здійснення заходів щодо усунення пошкоджень дасть змогу суттєво зменшити ризики виникнення аварійних ситуацій на накопичувачі.

До цього ж аспекту варто віднести перебування території накопичувача в тимчасовій окупації, про що вже було зазначено раніше. Перебування сторонніх осіб та повна відсутність контролю за техногенним об'єктом унеможливорює мінімізацію вже існуючих ризиків. У зв'язку із цим окупація нині є найбільш небезпечним і непередбачуваним чинником небезпеки для накопичувача.

### Дискусія і висновки

Проаналізована екологічна ситуація, пов'язана з багаторічною експлуатацією накопичувача стічних вод "Красителя", вказує на ряд негативних наслідків, масштаби яких змінювались та зростали під час активного функціонування підприємства. На сучасному етапі (завод ліквідовано) існування техногенного об'єкта залишається актуальною проблемою – в зоні впливу накопичувача відбувається комплексне навантаження на компоненти НПС.

Аналізуючи вплив накопичувача, у статті встановлено та охарактеризовано чинники екологічної небезпеки для цього об'єкта, які за характером виникнення поділяються на природні і техногенні. Крім того, ведення активних бойових дій та окупація території протягом останніх трьох років призвели до появи військових чинників небезпеки, що загалом належать до техногенних. Виділені чинники є не просто потенційно небезпечними – їх вплив частково відображається на самому об'єкті та прилеглих територіях, тому це принципово новий погляд на цей накопичувач. Вплив природних і техногенних чинників часто взаємопов'язаний – цьому сприяє складність техногенного об'єкта і своєрідність території (геологічні і гідрогеологічні умови, тектонічна будова).

Накопичувач ще з початку роботи підприємства вміщував агресивні відходи (аміак, їдкий натрій, хлористий амоній та ін.), а їх з'єднання безпосередньо здійснюють вплив на підземні води, в тому числі питні (закриті та/або переведені на технічне водокористування водозабори). На сьогодні склад відходів суттєво відрізняється від початкового, проте потенціал небезпеки залишається величезним. Тому моніторинг таких об'єктів – безпосередньо накопичувача "Красителя" і йому подібних – це дуже важлива складова екологічної безпеки прилеглих територій.

**Внесок авторів:** Ніна Міхалкова – концептуалізація, написання (оригінальна чернетка); Ігор Удалов – концептуалізація, написання (перегляд і редагування).

#### Список використаних джерел

- Бондарчук, В.Г. (1949). *Геоморфологія УРСР (геологічний розвиток рельєфу УРСР)*. Радянська школа.
- Бузило, В.І., & Павличенко, А.В. (2014). Екологічні та техногенні наслідки ліквідації вугільних шахт. *Розробка родовищ: Збірник наукових праць*, 8, 535–540. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/104588/66-Buzilo.pdf?sequence=1>
- Державна служба геології та надр України, Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України". (2021). *Стан підземних вод України, щорічник*.
- Державне підприємство "Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій". (2014). *Будівництво в сейсмічних районах України* (ДБН В.1.1-12:2014). [https://fe-construction.gov.ua/laws\\_detail/3038077155897509804?doc\\_type=2](https://fe-construction.gov.ua/laws_detail/3038077155897509804?doc_type=2)
- Державне підприємство "Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій". (2011). *Гідротехнічні, енергетичні та меліоративні системи і споруди, підземні гірничі виробки. Гідротехнічні споруди. Основні положення* (ДБН В.2.4-3:2010). <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00070>
- Іванюта, С.П., Коломієць, О.О., Малиновська, О.А., & Якушенко, Л.М. (2020). *Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь*. (Іванюта, С.П., ред.). НІСД.
- Ішчук, С.І., & Гладкий, О.В. (2011). *Географія промислових комплексів*. Знання.
- Міхалкова, Н.В., & Кононенко, А.В. (2024). Кліматичні зміни як чинник небезпеки для накопичувача ТОВ "Рубіжанський Краситель". У Ю. І. Яремко, Н. М. Лавренко, О. М. Коваленко, І. Ю. Баруліна (Ред.). *Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення* (с. 69–72). Херсонський державний аграрно-економічний університет.
- Міхалкова, Н. В., & Кононенко, А. В. (2022). Потенційні екологічні ризики на території Лисичансько-Рубіжанської промислової агломерації у зв'язку з військовими діями. У Г. Артеменко, Т. Кошлякова, Н. Крюченко, Г. Кульчеська, Г. Павлов, М. Орлюк, В. Сьомка, В. Хоменко (Ред.). *Геологічна будова та корисні копалини України* (с. 97–100). Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України.
- Міхалкова, Н. В., Кононенко, А. В., & Удалов, І. В. (2022). Аналіз впливу техногенних об'єктів Лисичансько-Рубіжанського промвузла на екологічний стан навколишнього природного середовища. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 56, 225–239. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-17>
- Міхалкова, Н. В., & Удалов, І. В. (2024). Вплив накопичувача ТОВ "Рубіжанський Краситель" на стан геологічного середовища. У М. М. Волошин, Д. О. Ладичук (Ред.). *Сучасні технології та досягнення інженерних наук в галузі гідротехнічного будівництва та водної інженерії* (с. 65–68). Херсонський державний аграрно-економічний університет.
- Мішуківа, Г.О. (2018). Дослідження по проведенню біологічного етапу рекультивації накопичувачів БАТ "Рубіжанський Краситель". *Екологічні проблеми регіону* (с. 44–45). Національний технічний університет "Дніпровська політехніка".
- Назаренко, О.С., & Зайцева, С.О. (2014). Дослідження по використанню шлаків ТЕС для очищення стічних вод виробництв органічних напівпродуктів і барвників. *Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Дала*, 10(217), 92–96. <https://core.ac.uk/download/pdf/84593978.pdf>
- Ніколаєва, І., Ленко, Г., Аверін, Д., & Лободзінський, О. (2020). *Дослідження поточною стану хвостосховищ у Донецькій та Луганській областях*. Координатор проєктів ОБСЕ в Україні. <https://www.osce.org/uk/project-coordinator-in-ukraine/486259>
- Рудько, Г. І., & Плахотний, С. А. (2015). Екологічна безпека вугільних родовищ Донецького вугільного басейну. *Екологічні науки*, 2(9), 121–128.
- Рудько, Г. І., & Яковлев, Є. О. (2020). Постмайнінг гірничодобувних районів України як новий напрям екологічно безпечного використання мінерально-сировинних ресурсів. *Мінеральні ресурси України*, 3, 37–44. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.3.37-44>
- Свинко, Й. М., & Сивий, М. Я. (2003). *Геологія*. Либідь.
- Соколов, В. А., Удалов, І. В., & Кононенко, А. В. (2021). Виконання спеціальних інженерно-геологічних досліджень на територіях промислових агломерацій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 54, 106–116. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-08>
- Удалов, І. В. (2016). *Трансформація геологічного середовища під впливом техногенних процесів в умовах Північно-Східного Донбасу*. ХНУ ім. В. Н. Каразіна.
- Удалов, І. В., & Кононенко, А. В. (2016). Вплив техногенних факторів на еколого-гідротехнічні характеристики крейдових водозаборів північно-східного Донбасу. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 45, 177–183. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-45-24>
- Яковлев, Є.О., Сплідитель, А.О., & Чумаченко, С.М. (2021). Оцінка еколого-геохімічного стану поверхневих вод Донбасу. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 28, 129–137. [http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9716/2/uhmj\\_28\\_2021\\_129.pdf](http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9716/2/uhmj_28_2021_129.pdf)
- Del Giudice, V., De Paola, P., Bevilacqua, P., Pino, A., & Del Giudice, F. P. (2020). Abandoned Industrial Areas with Critical Environmental Pollution: Evaluation Model and Stigma Effect. *Sustainability*, 12(13), 5267. <https://doi.org/10.3390/su12135267>
- EU actions to address the increasing amount of hazardous waste. (2023). [https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw23\\_02/rw\\_hazardous\\_waste\\_en.pdf](https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw23_02/rw_hazardous_waste_en.pdf)
- Santucci, L., Carol, E., & Tanjal, C. (2018). Industrial waste as a source of surface and groundwater pollution for more than half a century in a sector of the Río de la Plata coastal plain (Argentina). *Chemosphere*, 206, 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.084>
- Srivastava, R., Rajak, D., Ilyas, S., Kim, H., & Pathak, P. (2023). Challenges, Regulations, and Case Studies on Sustainable Management of Industrial Waste. *Minerals*, 13(1), 51. <https://doi.org/10.3390/min13010051>

#### References

- Bondarchuk, V.G. (1949). *Geomorphology of the Ukrainian SSR (geological development of the relief of the Ukrainian SSR)*. Radianska shkola [in Ukrainian].
- Buzilo, V. I., & Pavlychenko, A. V. (2014). Ecological and technogenic consequences of the liquidation of coal mines. *Development of deposits: Collection of scientific works*, 8, 535–540 [in Ukrainian]. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/104588/66-Buzilo.pdf?sequence=1>
- Del Giudice, V., De Paola, P., Bevilacqua, P., Pino, A., & Del Giudice, F. P. (2020). Abandoned Industrial Areas with Critical Environmental Pollution: Evaluation Model and Stigma Effect. *Sustainability*, 12(13), 5267. <https://doi.org/10.3390/su12135267>
- EU actions to address the increasing amount of hazardous waste. (2023). [https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw23\\_02/rw\\_hazardous\\_waste\\_en.pdf](https://www.eca.europa.eu/lists/ecadocuments/rw23_02/rw_hazardous_waste_en.pdf)
- Ishchuk, S. I., & Hladkyi, O. V. (2011). *Geography of Industrial Complexes: Textbook*. Znannia [in Ukrainian].
- Ivaniuta, S. P., Kolomiets, O. O., Malynovska, O. A., & Yakushenko, L. M. (2020). *Climate change: consequences and adaptation measures: analytical report*. (Ivaniuta S. P., Red.). NISD [in Ukrainian].
- Mikhalkova, N. V., & Kononenko, A. V. (2024). Climatic changes as factor of danger are for the store of "Rubizhanskyi Krasytel". In Yu. I. Yaremko, N. M. Lavrenko, O. M. Kovalenko, I. Yu. Barulina (Red.). *The impact of climate change on the spatial development of the Earth's territories: consequences and solutions* (69–72). Kherson State Agrarian and Economic University [in Ukrainian].
- Mikhalkova, N. V., & Kononenko, A. V. (2022). Potential environmental risks in the territory of the Lysychansko-Rubizhanskyi industrial agglomeration in connection with military operations. In H. Artemenko, T. Koshliakova, N. Kriuchenko, H. Kulchetska, H. Pavlov, M. Orliuk, V. Somka, V. Khomenko (Red.). *Geological structure and minerals of Ukraine* (97–100). M.P. Semenenko institute of geochemistry, mineralogy and ore formation of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
- Mikhalkova, N. V., Kononenko, A. V., & Udalov, I. V. (2022). Analysis of the influence of technogenic facilities of the Lysychansk-Rubizhne industrial hub on the ecological state of the natural environment. *Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 56, 225–239 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-17>
- Mikhalkova, N. V., & Udalov, I. V. (2024). The impact of the "Rubizhanskyi Krasytel" storage tank on the state of the geological environment. In M. M. Voloshyn, D. O. Ladychuk (Eds.). *Modern technologies and achievements of engineering sciences in the field of hydraulic construction and water engineering* (65–68). Kherson state agrarian and economic university [in Ukrainian].
- Mishukova, H.O. (2018). Research on the implementation of the biological stage of storage storage reclamation of "Rubizhanskyi Krasytel". *Environmental problems of the region* (44–45). National Technical University "Dnipro Polytechnic" [in Ukrainian].
- Nazarenko, O.S., & Zaitseva, S.O. (2014). Research on the use of thermal power plant slags for wastewater treatment of organic intermediates and dyes. *Bulletin of the Volodymyr Dali east ukrainian national university*, 10(217), 92–96 [in Ukrainian]. <https://core.ac.uk/download/pdf/84593978.pdf>
- Nikolaieva, I., Lenko, H., Avenir, D., & Lobodzinskiy, O. (2020). *Research of the current state of tailings storage facilities in Donetsk and Luhansk regions*. Coordinator of OSCE projects in Ukraine [in Ukrainian]. <https://www.osce.org/uk/project-coordinator-in-ukraine/486259>
- Rudko, H. I., & Plakhotniy, S. A. (2015). Environmental safety of coal deposits of the Donetsk coal basin. *Environmental sciences*, 2(9), 121–128 [in Ukrainian].
- Rudko, H. I., & Yakovlev, Ye. O. (2020). Postmining of mining areas of Ukraine as a new direction of environmentally safe use of mineral resources. *Mineral resources of Ukraine*, 3, 37–44 [in Ukrainian].
- Santucci, L., Carol, E., & Tanjal, C. (2018). Industrial waste as a source of surface and groundwater pollution for more than half a century in a sector of the Río de la Plata coastal plain (Argentina). *Chemosphere*, 206, 727–735. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.05.084>
- Sokolov, V. A., Udalov, I. V., & Kononenko, A. V. (2021). Implementation of the special engineer-geological researches in the territories of industrial and urban agglomerations. *Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 54, 106–116 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-08>



Srivastava, R., Rajak, D., Ilyas, S., Kim, H., & Pathak, P. (2023). Challenges, Regulations, and Case Studies on Sustainable Management of Industrial Waste. *Minerals*, 13(1), 51. <https://doi.org/10.3390/min13010051>

State Enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2014). *Construction in seismic areas of Ukraine* (DBN V.1.1-12:2014) [in Ukrainian]. [https://e-construction.gov.ua/laws\\_detail/3038077155897509804?doc\\_type=2](https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3038077155897509804?doc_type=2)

State Enterprise "State Research Institute of Building Structures". (2011). *Hydraulic, energy and reclamation systems and structures, underground mining. Hydraulic structures. Basic provisions* (DBN V.2.4-3:2010) [in Ukrainian]. <https://ips.ligazakon.net/document/DBN00070>

State Service of Geology and Subsoil of Ukraine, State Scientific and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine". (2021). *State of Groundwaters of Ukraine, Yearbook* [in Ukrainian].

Svynko, Y. M., & Syvyi, M. Ya. (2003). *Geology: Textbook*. Lybid [in Ukrainian].

Udalov, I. V., & Kononenko, A. V. (2016). The influence of technogenic factors on the ecological and hydrogeological characteristics of chalk water intakes of the north-eastern Donbass. *Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 45, 177–183 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2016-45-24>

Udalov, I. V. (2016). *Transformation of the geological environment under the influence of anthropogenic processes in the conditions of the North-Eastern Donbass*. V. N. Karazin Kharkiv National University [in Ukrainian].

Yakovliev, Ye.O., Splodytel, A.O., & Chumachenko, S.M. (2021). Assessment of the ecological and geochemical state of surface waters of Donbas. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 28, 129–137 [in Ukrainian]. [http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9716/2/uhmj\\_28\\_2021\\_129.pdf](http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/9716/2/uhmj_28_2021_129.pdf)

Отримано редакцією журналу / Received: 03.04.25

Прорецензовано / Revised: 16.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Nina MIKHALKOVA, PhD Student  
ORCID ID: 0000-0001-9119-213X  
e-mail: mikhalkovanini@gmail.com  
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

Igor UDALOV, DSc (Geol.), Prof.  
ORCID ID: 0000-0003-3844-6481  
e-mail: igorudalov8@gmail.com  
V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

## ANALYSIS OF FACTORS OF ENVIRONMENTAL HAZARD FOR THE WASTE STORAGE UNIT LLC "RUBIZHANSKY KRASYTEL"

**Background.** The article is devoted to environmental hazard factors, that can negatively affect the condition of the highly mineralized wastewater storage of LLC "Rubizhansky Krasytel". The relevance of the work is due to the existing environmental problems, that accompany the long-term operation of the man-made facility.

**Methods.** The study employed an analysis of available information on the geological and hydrogeological conditions of the area and the technical state of the waste accumulation facility. Environmental risk assessment was carried out based on literary sources, cartographic materials, and logical analysis of the influence of natural and technogenic factors. Given the lack of access to the site, a conditional modeling approach was applied to simulate potential impact scenarios considering identified risk factors.

**Results.** The main hazard factors, according to their origin, are divided into natural and man-made. It is established that the influence of natural hazard factors is due to the peculiarities of the territory where the man-made facility is located and global climate changes. The main processes that pose a potential threat to the spread of substances from the storage tank are described, both from the endogenous natural component (geological structure of the territory, hydrogeological conditions) and exogenous (climatic and hydrological conditions). It is noted that the location of the storage facility in the zone of influence of the North-Donetsk thrust contributes to the spread of substances from the storage facility in the geological environment. It is noted, that the condition of the structures partially reflects the manifestations of the influence of certain factors, but their further action can provoke an emergency situation on the storage tank.

**Conclusions.** The analyzed technogenic hazard factors indicate a number of adverse processes, the potential threat of which is directly related to the violation of the conditions of operation of the facility. At the same time, the presence of signs indicating damage to structures and communications is noted. The article determines that military hazard factors, which are technogenic, currently have the highest degree of probability of destructive impact on the storage facility. It is noted that the territory being under the control of third parties, namely the occupation forces, has created a rather dangerous situation, taking into account the material composition of the waste. Moreover, these circumstances nullify any ways to solve the existing environmental problems of the adjacent territory, making access to the facility impossible.

**Keywords:** hazard factor, waste storage facility, pollutants, migration, environment, geological environment, groundwater, risks of an emergency situation.

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 553; 504.062.2; 330.101

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.13>

Oleksii ZURIAN, DSc (Engin.)

ORCID ID: 0000-0002-2391-1611

e-mail: alexey\_zuryan@ukr.net

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Andriy TOLKUNOV, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-9904-9693

e-mail: schreibikus@ukr.net

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Tetiana OMELCHENKO, PhD (Economics), Senior researcher, expert

ORCID ID: 0009-0004-8097-5787

e-mail: omelchenko.t@gmail.com

Research and Development Center "EcoUkraine" PO "Scientific Institution Digital Agency «E-Ecology»", Kyiv, Ukraine

RISK CONSIDERATIONS IN THE STUDY OF INVESTMENT ATTRACTIVENESS  
OF GEOTHERMAL ENERGY OBJECTS

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

**Background.** The article explores a comprehensive approach to risk assessment affecting the investment attractiveness of projects in the field of geothermal energy. This involves the combination of various objective prerequisites, opportunities, and limitations arising during the process of attracting investments in the development of geothermal energy, which can create conditions for the rational and effective use of available resources (natural, human, informational, technological, capital, etc.). Special attention is given to local, regional, and techno-environmental risk factors.

**Methods.** The study utilizes methods that combine financial and economic analysis, risk assessment, technical expertise, examination of the regulatory and legal environment, and market conditions. The core of the research involves the calculation of financial indicators such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Discounted Cash Flows (DCF), and payback period, which help assess the potential profitability of a project. The technical assessment includes environmental expertise and an analysis of the sustainability of geothermal resource use, particularly the depth of deposits and temperature potential. At the same time, it is crucial to study the regulatory framework concerning subsoil use and tariff regulation. This approach ensures the validity of investment decisions and minimizes risks.

**Results.** During the study, the authors proposed an improved method for assessing investment risks in geothermal energy, taking into account a comprehensive analysis of the interconnection between local, regional, and techno-environmental factors. A method for ranking risks based on their impact on project effectiveness was also developed, along with recommendations for their minimization. The proposed methods improve the accuracy of forecasting and the justification of investment decisions in this field.

**Conclusions.** It is analytically substantiated that the Levelized Cost of Energy (LCOE) with risk adjustments allows for accounting for all possible losses and uncertainties, just as NPV evaluates financial attractiveness and helps determine whether investing is worthwhile. It is also determined that considering regional and local risks provides a more realistic assessment of investing in geothermal energy. Promising areas for future research in this field include the development of more precise risk assessment models using modern digital technologies, such as machine learning and big data. Moreover, improving methods of environmental monitoring and developing effective strategies for minimizing technogenic risks is important. Research on the impact of climate change on the stability of geothermal resources, as well as improving the legislative and regulatory framework to stimulate investment in the sector, can contribute to the sustainable development of geothermal energy.

**Keywords:** geothermal energy, subsoil use, investment attractiveness, risks, renewable energy, environmental safety, risk management, development prospects.

## Background

Fundamental and applied works on determining the investment attractiveness of renewable energy facilities, including geothermal energy as a component of it, have been carried out both in Ukraine and worldwide for a long time. Theories of investment and the evaluation of the effectiveness of investment projects are dedicated to the works of authors (Tatarenko, & Poruchnyk, 2000; Suprun, & Yukhymchuk, 2009; Chorna, Smirnova, & Buhrimenko, 2017; Karpov, & Horbachenko, 2013). The analysis of strategic investment directions in renewable energy in the context of national economic development has been conducted in the works (Drach, 2023; Sivitska, 2014; Dyachuk et al., 2019). Structural analysis of the costs for implementing a wind power plant investment project is presented in the works (Hlushchenko, 2023; Ivanchenko, & Tuchynskyi 2007; Stehly, Tyler, Duffy, & Patrick, 2021). Separate studies focus on modeling and analyzing the cost of electricity from renewable sources (Tochenyi, Reztsov, & Tuchynskyi, 2010). Research on the investment

attractiveness of mineral resources and the evaluation of risks has been presented in the works of many authors [Mykhailov et al., 2023; Rudko, Karli, & Tolkunov, 2022; Kumar, 2022; Lukawski, Silverman, & Tester, 2016; Savchuk, 2024; Zurian, Levchenko, & Pidtilok, 2015).

Research on the efficiency of using the thermal potential of the environment and the upper layers of the Earth's crust in Ukraine is described in the works (Morozov, 2019). Active research is underway to study the physical features and energy efficiency of using water from underground horizons, with a focus on technical, economic, and ecological analysis of implementing geothermal systems of this type (Zurian, 2023a; Zurian, 2023b).

The results of recent publications confirm the promising direction of research into the technical, economic efficiency, and profitability of implementing geothermal energy projects, including the use of low-potential thermal energy from the upper layers of the Earth for heating, cooling, hot water supply, and meeting technological needs of consumers. At the same time, the problem of economic-mathematical

modeling for assessing the economic attractiveness of heat supply technologies based on the use of geothermal energy, taking into account all possible risks of using this type of renewable energy, remains relevant.

**Problem Statement.** The analysis of scientific publications and practical experience in the application of methods for evaluating investment efficiency, taking into account risks, will contribute to enhancing the level of scientific research on the prospects of geothermal energy development and the investment attractiveness of relevant projects.

#### Results

The investment attractiveness of geothermal energy objects is the combination of various objective preconditions, opportunities, and limitations that arise in the process of

attracting investments in the development of geothermal energy, which can create conditions for the rational and effective use of available resources (natural resources, human resources, information resources, technologies, capital, etc.). The main criteria for the investment attractiveness of geothermal energy objects should be the values of Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Capital Expenditure volumes (CAPEX), payback period, and the levelized cost of energy (LCOE). Corresponding calculations are carried out taking into account the current and forecast market conditions, the characteristics of the investment regime, as well as geological, technological, ecological, economic, and political risks (Fig. 1).

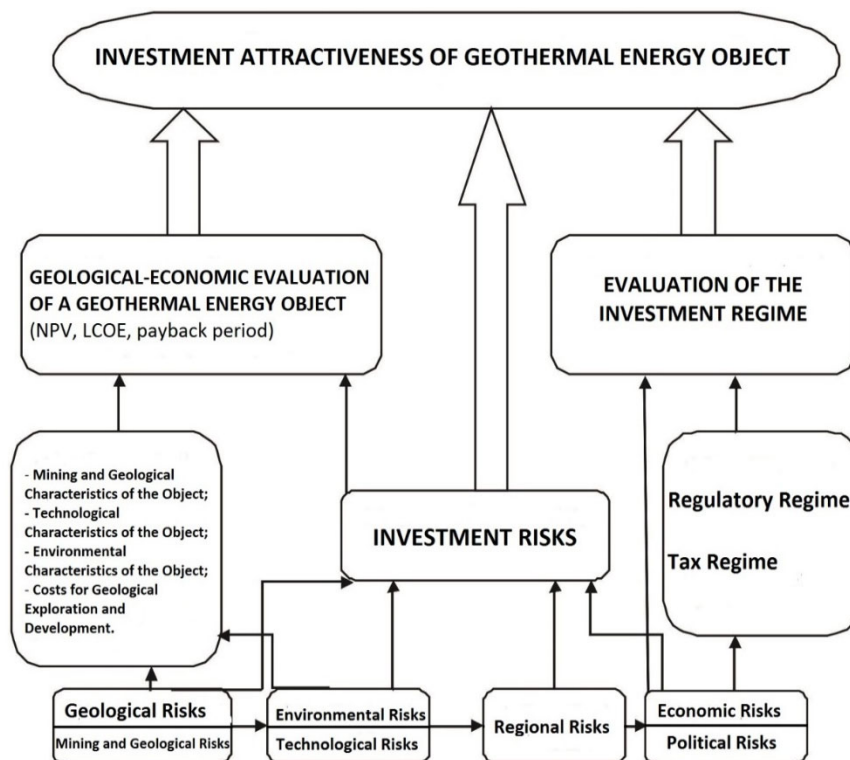


Fig. 1. Investment Attractiveness of Geothermal Energy Projects

It is proposed to conditionally divide the main factors of the investment attractiveness of geothermal energy objects into two major groups. Thus, the factors related directly to the underground water extraction objects for thermal energy purposes are local (geological, mining-geological, technological, techno-economic, and ecological), while those related to the region in which the implementation of the projects is planned are regional (regulatory, economic, geographical, and natural-geographical) (Table 1).

Before making a decision regarding the implementation of a geothermal energy project, the potential subsoil user attempts to analyze as much available information as possible (geological, economic, regulatory) in order to assess the level of investment potential and investment risk. Therefore, the issue of accounting for risks when studying the investment attractiveness of geothermal energy projects is the focus of this research.

Today, several traditional methods for calculating risks that affect the investment attractiveness of geothermal energy projects exist. These methods are based on economic, geological, technological, and environmental analysis. For example, the scenario analysis method

(Shelikhov, & Masalska, 2015). Today, technological forecasting has become an essential tool for decision-making, at least at the strategic level for management bodies at all levels. However, besides decisions related to the development of the organization, scenario analysis can also be used to address issues related to the investment attractiveness of geothermal energy projects. For instance, this method allows for the consideration of different project development scenarios depending on changes in key risk factors (such as fluctuations in reservoir temperature, initial well flow rates, and electricity prices). For each scenario, possible financial outcomes and risk levels are assessed.

Another applicable method is the Monte Carlo method, which is used to model uncertainties by performing random trials multiple times within the defined parameters (geological, technological, economic). This allows for the estimation of the probability of achieving certain economic indicators (NPV, IRR). Using the sensitivity analysis method, one can determine which factors have the greatest impact on the project's effectiveness. This is done by changing the values of specific parameters (for example, extraction costs, electricity tariffs) and assessing their influence on financial results.



Table 1

The main factors of the investment attractiveness of geothermal energy objects

| Factors Related to the Geothermal Energy Object                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Factors Related to the Location of Project Implementation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Geological:</b><br>- Features of the object's structure, composition of rocks, type and characteristics of the deposit, water volume, etc.<br><b>Mining-Geological:</b><br>- Depth of the water-bearing horizon, initial formation pressure and temperature, initial well flow rate and filtration parameters, operating depression, extraction coefficient, etc.<br><b>Technological:</b><br>- Chemical composition, presence of accompanying components, extraction and product preparation technologies, extraction coefficient of useful components, etc.<br><b>Techno-Economic:</b><br>- Methods and systems of operation, production cost, capital and operational expenses, profit size, profitability level of the object's operation, risk capital (cost of geological exploration works), etc.<br><b>Ecological:</b><br>- Economic value of areas being alienated, possible environmental consequences from breaching the integrity of subsoil, water regime, etc., and costs for minimizing the negative ecological impacts of the object's operation. | <b>Regulatory:</b><br>- Organizational and legal regime of subsoil use, its state (public) regulation,<br>- Stability of the political system; stability and predictability of the state's investment policy, general and mining legislation, conditions under which investors can carry out exploration, development, and extraction of minerals (concessions, production-sharing agreements, joint ventures, service contracts), export rights for extracted products, etc.<br><b>Economic:</b><br>- Product price, demand and consumption levels in local and external markets, tax regime, availability of sales markets, level of competition, etc.<br><b>Natural-Geographical:</b><br>- Geographical, geomorphological, and climatic conditions of the area, type of terrain, availability of infrastructure (proximity to transport infrastructure, processing plants, communication routes, availability of electricity and water resources), availability of workforce, etc. |

It is also possible to forecast and systematize the main risks (geological, techno-economic, environmental, political) and assess their potential impact on the investment attractiveness of the project using risk factor analysis. Among classic methods, the discounted cash flow method can be mentioned. Although this method is mostly used for evaluating the financial efficiency of a project, it can also be used for accounting for risks by adjusting the discount rate. The higher the level of risk, the higher the discount rate applied to adjust future cash flows.

Furthermore, considering that modern geothermal projects increasingly use GIS technologies and underground reservoir modeling for more accurate assessments of geological and hydrothermal risks, traditional methods place the main emphasis on financial calculations, geological analysis, and technological factors. However, today, with the development of digital technologies, machine learning, big data, and digital modeling methods are increasingly being applied to more accurately assess risks and the investment attractiveness of geothermal projects.

Each of the traditional methods for assessing risks in the field of geothermal energy has certain drawbacks. The general problems inherent in these approaches include a high degree of uncertainty in the initial data, limited consideration of interdependencies between risks, insufficient adaptation to changing conditions, high subjectivity of assessments, complexity in calculations and resource intensity, as well as inadequate consideration of environmental risks and the impact of an unstable regulatory environment.

Thus, none of the traditional methods are perfect. The best results are achieved through their combination and the use of modern digital technologies. To improve the accuracy of risk assessment, it is necessary to consider the multidimensional relationships between factors and to continuously update data in light of real changes in the geothermal energy sector.

Given the above, it can be argued that modern approaches to risk assessment in the field of geothermal energy should focus on improving forecasting accuracy, accounting for interrelationships between risks, and adapting to changing conditions. In our opinion, key methods that could improve risk assessment include:

**1. The use of artificial intelligence and machine learning.** This approach allows for the analysis of large

volumes of data to identify hidden dependencies between risk factors. Automatic training of models based on historical data on geothermal projects can enhance the accuracy of forecasting geological, technological, and financial risks. For example, neural network algorithms can predict the likelihood of seismic tremors, fluid leaks, or decreased well flow rates based on geological and hydrothermal data. Deep learning can help determine optimal field development parameters with minimal risks.

**2. The use of geographic information systems (GIS) and reservoir digital modeling.** This approach allows the creation of detailed 3D models of geothermal systems for more accurate forecasting of reservoir behavior and visualization of risks associated with fluid movement, seismic processes, potential leaks, and other environmental threats. For example, GIS systems help combine geological, climatic, and economic data to create integrated risk maps, while underground reservoir modeling can predict the longevity of geothermal wells and potential operational problems.

**3. The use of Bayesian networks for assessing complex risks.** This approach allows for considering the interrelationships between various risk factors (e.g., the dependence between changes in formation pressure and the risk of hot water breakthrough into other horizons), as well as performing dynamic updates to forecasts as new data arrives. For instance, Bayesian models can assess how changes in reservoir temperature will affect the longevity of wells and the economic feasibility of the project.

**4. Integration of environmental and social factors into risk analysis.** This enables more accurate consideration of the impacts of geothermal projects on the environment and local communities, as well as the assessment of effects on the ecosystem.

The authors have proposed a comprehensive approach to assessing risks that impact the investment attractiveness of geothermal energy projects. Special attention is paid to local, regional, and techno-environmental risk factors. Local risks include geological (features of the object's structure, rock composition, resource volume, etc.), mining-geological (deposit depth, temperature regime, filtration parameters), technological (chemical composition, extraction technologies), techno-economic (production costs, profitability level), and environmental aspects (disruption of subsoil integrity, costs for minimizing environmental impacts).

Among regional factors, political (state regulation, stability of investment policy), economic (tax regime, competition level), and natural-geographical (infrastructure conditions, resource availability) factors are considered. Additionally, techno-environmental risks are analyzed, including the potential for thermal water leakage, contamination of aquifers, seismic risks, and ground surface deformations.

In the course of the study, the authors proposed an improved methodology for assessing investment risks in geothermal energy, which considers a comprehensive analysis of the interconnection between local, regional, and techno-environmental factors.

A generalized mathematical model of the economic attractiveness of geothermal energy projects is proposed, based on the discounted cash flow method, determination of production cost considering the life cycle of the energy installation, calculation of the normalized production price of energy products, and capital expenditure indicators, taking into account risk.

One of the most important indicators of the effectiveness of an investment project is the Net Present Value (NPV). This indicator represents the sum of all cash flows discounted to the present moment (as of the date of the investment project evaluation): The net present value is calculated using the formula.

The equation for calculating NPV considering risks is proposed to be written in the following form:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i)^t}, \quad (1)$$

Where  $S_t$  – the net cash flow in period  $t$ , i.e., the sum of all revenues minus the sum of all expenses for that period;  $i$  – the discount rate for one period (usually a year).

Very often, the discount rate (NPV) is calculated using the NBU's (National Bank of Ukraine) discount rate. The NBU's discount rate ranged from 10 % to 25 % in 2022–2024. As of January 25, 2025, it stood at 14.5 % (National, 2024).

The authors suggest applying a risk premium to the discount rate depending on the probability of an unwanted loss/hazard occurring (Table 2).

Table 2

Risk premium to the discount rate based on the probability of unwanted loss/hazard occurrence

| Risk                    | Risk Premium to Discount Rate (%)                       |                                                          |                                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                         | Probability of Unwanted Loss/Hazard<br>From 0 % to 30 % | Probability of Unwanted Loss/Hazard<br>From 30 % to 70 % | Probability of Unwanted Loss/Hazard<br>From 70 % to 100 % |
| Geological Risk         | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |
| Mining-Geological Risks | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |
| Technological Risks     | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |
| Economic Risks          | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |
| Environmental Risks     | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |
| Political Risks         | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |
| Regional Risks          | 1 %–3 %                                                 | 3 %–7 %                                                  | 7 %–10 %                                                  |

This table reflects the potential risk premium applied to the discount rate, depending on the probability (0% to 30%) of experiencing undesirable losses or hazards. The risk premium will vary based on the likelihood of each specific risk occurring, impacting the overall investment evaluation of geothermal energy projects. The actual risk premium values for each risk type should be filled in based on the project-specific risk assessment and factors.

In this article, it is proposed to account for the risk factor in the NPV calculation by adding a "total risk component" in addition to the NBU base interest rate, depending on the factors and evaluation criteria according to Tables 1 and 2.

To account for the risks associated with the implementation of geothermal energy projects, the authors propose calculating the risk premium added to the discount rate using the following equation:

$$r_{c.r.} = r_{ref} + r_{geo} + r_{min} + r_{tech} + r_{ecom} + r_{env} + r_{pol} + r_{reg}, \quad (2)$$

where:  $r_{c.r.}$  – discount rate considering risk;  $r_{ref}$  – NBU base interest rate;  $r_{geo}$  – geological risk (probability of insufficient flow rate, temperature drop);  $r_{min}$  – mining-geological risks (pressure, depth, resource extraction);  $r_{tech}$  – technological risks (equipment efficiency, availability of supporting components);  $r_{econ}$  – economic risks (competition, energy prices, taxes);  $r_{env}$  – environmental risks (pollution, thermal water leakage, seismic risks);  $r_{pol}$  – political risks (regulatory changes, legislative stability);  $r_{reg}$  – regional risks (infrastructure remoteness, transportation costs).

Thus, the equation for calculating NPV considering risks is proposed to be written in the following form:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+(i+r_{c.r.}))^t} \quad (3)$$

An important component of evaluating the investment attractiveness of geothermal energy projects is the

calculation of the Levelized Cost of Energy (LCOE), which takes into account all key parameters.

$$LCOE = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{C_t + O_t + R_t + E_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (4)$$

where  $C_t$  – capital costs for construction and well drilling in year  $t$ ;  $O_t$  – operational and technical costs in year  $t$  (maintenance, extraction, energy preparation);  $R_t$  – costs for risk management and environmental measures;  $E_t$  – amount of energy produced in year  $t$ ;  $r$  – discount rate;  $n$  – total lifetime of the installation (years).

The discount rate is usually taken as the NBU (National Bank of Ukraine) rate.

An integrated risk factor coefficient  $R_f$  is also used, which includes risks that impact the economic attractiveness of the geothermal energy project. This indicator is used when considering risk in the normalized production price.

The corresponding equation, which accounts for risks in the normalized cost of energy production, looks like this:

$$LCOE^* = LCOE \times (1 + R_f), \quad (5)$$

where  $R_f$  – integrated risk factor coefficient:

$$R_f = \omega_1 R_{geo} + \omega_2 R_{min} + \omega_3 R_{tech} + \omega_4 R_{ecom} + \omega_5 R_{env} + \omega_6 R_{pol} + \omega_7 R_{reg}, \quad (6)$$

Each of these components determines the risk by direction:  $R_{geo}$  – geological risk (probability of insufficient flow, temperature drop);  $R_{min}$  – mining-geological risks (pressure, depth, resource extraction);  $R_{tech}$  – technological risks (equipment efficiency, availability of supporting

components);  $R_{econ}$  – economic risks (competition, energy prices, taxes);  $R_{env}$  – environmental risks (pollution, thermal water leakage, seismic risks);  $R_{pol}$  – political risks (regulatory

changes, stability of legislation);  $R_{reg}$  – regional risks (distance of infrastructure, transport costs).

Table 3

**Risk surcharge in the normalized cost of energy production depending on the probability of undesirable loss/threat occurrence**

| Risk                    | Risk Premium to Discount Rate (%)                       |                                                          |                                                           |
|-------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|                         | Probability of Unwanted Loss/Hazard<br>From 0 % to 30 % | Probability of Unwanted Loss/Hazard<br>From 30 % to 70 % | Probability of Unwanted Loss/Hazard<br>From 70 % to 100 % |
| Geological Risk         | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |
| Mining-Geological Risks | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |
| Technological Risks     | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |
| Economic Risks          | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |
| Environmental Risks     | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |
| Political Risks         | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |
| Regional Risks          | 0,01–0,03                                               | 0,03–0,07                                                | 0,07–0,1                                                  |

Each component is determined by the probability of the risk occurrence  $P_i$  and the possible economic impact  $I_i$ :

$$R_i = P_i \times I_i, \quad (7)$$

For example, if the probability of contamination of the aquifer  $P_{env} = 0.1$ , and the cost of the consequences (penalties, restoration)  $I_{env} = 5$  million UAH, then:

$$R_{env} = 0.1 \times 5 = 0.5 \text{ million UAH}$$

The lifetime of the installation is modeled as a function of productivity reduction over time:

$$E_t = E_0 \times e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

where  $E_0$  – initial capacity of the installation (MW);  $\lambda$  – coefficient of productivity reduction due to reservoir and equipment degradation.

The reduction in productivity affects capital expenditures and the need for modernization:

$$C_e = C_0 + C_{maint} (1 + \beta t), \quad (9)$$

where  $\beta$  – rate of increase in maintenance costs over time.

Thus, the investment efficiency can be evaluated through the Net Present Value (NPV), which is determined by the formula:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{(R_{envt} - C_t - O_t - R_t)}{(1+r)^t}, \quad (10)$$

where  $C_t$  – capital expenditures for construction and well drilling in year  $t$ ;  $O_t$  – operational and technical costs in year  $t$  (maintenance, extraction, energy preparation);  $R_t$  – costs for risk management and environmental measures;  $r$  – discount rate;  $n$  – total lifetime of the installation (years);  $R_{envt}$  – revenue from energy sales in year  $t$ :

$$R_{envt} = P_e \times E_t, \quad (11)$$

where  $P_e$  – price per 1 MWh.

The project can be considered investment-attractive if  $NPV > 0$ .

The results of a comprehensive analysis of the investment attractiveness of geothermal energy projects, taking risks into account, should provide the potential resource user with the necessary information for making a decision regarding the feasibility of implementing the respective project. On the other hand, such studies are necessary for an adequate assessment of the development prospects of geothermal energy and for improving investment and regulatory frameworks, as well as for the development of relevant state policies.

### Discussion and conclusions

The authors propose the category of investment attractiveness for geothermal energy projects. The factors affecting investment attractiveness are identified, which are

directly related to the underground water extraction objects for thermal energy needs. These include local factors (geological, mining-geological, technological, techno-economic, and ecological) and those related to the region where the projects are to be implemented – regional factors (regulatory, economic, geographical, and natural-geographical).

The use of NPV and LCOE calculation methods, taking risks into account, is analytically justified for assessing the investment attractiveness of geothermal energy projects. It is proposed to use a risk premium to the discount rate when calculating the NPV of geothermal energy investment projects, depending on the probability of undesirable loss or danger, with possible values of this premium identified.

Considering regional and local risks provides a more realistic evaluation of investment in geothermal energy.

Further research perspectives include the development of more precise risk assessment models using modern digital technologies, including machine learning and big data. Moreover, improving methods of environmental monitoring and developing effective strategies for minimizing technogenic risks is crucial. The results of the evaluation of investment attractiveness of geothermal energy projects may be of interest not only to resource users but also to institutions and organizations studying the prospects for the development of this industry. Enhancing the regulatory and legal framework to stimulate investments in the geothermal energy sector should contribute to the sustainable development of the economy and strengthen energy security.

**Authors' contribution:** Oleksii Zurian – conceptualization, methodology, writing (original draft), Andriy Tolkunov – conceptualization, methodology, writing (original draft); Tetiana Omelchenko – data validation, writing (review and editing).

### References

- Bertrand, G., de Oliveira, D., Wellmer, F.-W., Hollis, J., Kovalenko, N., Malyuk, B., Mykhailov, V., & Wittenberg, A. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. BRGM-Orleans.
- Chorna, M. V., Buhrimenko, R. M., & Smirnova, P. V. (2017). *Cost management* [in Ukrainian]. [Чорна М. В., Смірнова П. В., Бугрименко Р. М. (2017). *Управління витратами*].
- Drach, S. (2024, May 30). The future of "green energy" in Ukraine. *Biz.ligazakon.net* [in Ukrainian]. [Драч, С. (2024, 30 травня). Майбутнє "зеленої енергетики" в Україні. *Biz.ligazakon.net*] [https://biz.ligazakon.net/analitics/224285\\_maybutn-zeleno-energetiki-v-ukrain](https://biz.ligazakon.net/analitics/224285_maybutn-zeleno-energetiki-v-ukrain)
- Dyachuk, O., Podolets, R., Yukhymets, R., Pekkoiev, V., Balik, O., & Simonsen, M. (2019). *Final report: Long-term energy modeling and forecasting in Ukraine: Scenarios for the action plan for implementing Ukraine's energy strategy until 2035*. Kyiv-Copenhagen [in Ukrainian]. [Дячук О., Подолець Р., Юхимець Р., Пеккоєв В., Балік О., Сімонсен М. (2019). *Заключний звіт. Довгострокове енергетичне моделювання та прогнозування в Україні: сценарії для плану дій реалізації Енергетичної*



стратегії України на період до 2035 року. Київ-Копенгаген]. [https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/ongterm\\_energy\\_modelling\\_and\\_forecasting\\_in\\_ukraine\\_ukrainian.pdf](https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/ongterm_energy_modelling_and_forecasting_in_ukraine_ukrainian.pdf)

Hlushchenko, Y., Korohodova, O., Chernenko, N., & Moiseienko, T. (2023). The path to Industry 5.0: A green economy evolution and energy innovations for sustainable development. *Economic Bulletin of NTUU "Kyiv Polytechnic Institute"*, 26. <https://doi.org/10.32782/2307-5651.26.2023.3>

Ivanchenko, I. V., & Tychynskyi, B. H. (2007). Structural analysis of costs for the implementation of a wind power station investment project. *In Materials of the VIII International Conference "Renewable Energy of the 21st Century"* (pp. 118–123). AR Crimea. [in Ukrainian]. [Іванченко, І. В., & Тучинський, Б. Г. (2007). Структурний аналіз витрат на реалізацію інвестиційного проекту вітрової електростанції. *Матеріали VIII Міжнародної конференції "Відновлювана енергетика XXI століття"* (с. 118–123). АР Крим].

Karпов, V. A., & Horbachenko, S. A. (2013). *Analysis of entrepreneurial projects*. ONEU [in Ukrainian]. [Карпов, В. А., & Горбаченко, С. А. (2013). *Аналіз підприємницьких проектів*. ONEU].

Kumar, L., Hossain, M. S., Assad, M. E. H., & Manoo, M. U. (2022). Technological advancements and challenges of geothermal energy systems: A comprehensive review. *Energies*, 15(9058). <https://doi.org/10.3390/en15239058>

Lukawski, M. Z., Silverman, R. L., & Tester, J. W. (2016). Uncertainty analysis of geothermal well drilling and completion costs. *Geothermics*, 64, 382–391. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.017>

Morozov, Y. P., Chalaev, D. M., Nikolaievskaya, N. V., & Dobrovolskyi, M. P. (2019). Efficiency assessment of utilizing the thermal potential of the environment and Earth's upper layers in Ukraine. *Renewable Energy*, 4(63), 80–88 [in Ukrainian]. [Морозов, Ю. П., Чалаєв, Д. М., Ніколаєвська, Н. В., & Добровольський, М. П. (2019). Оцінка ефективності використання теплового потенціалу довкілля та верхніх шарів Землі в Україні. *Відновлювана енергетика*, 4(63), 80–88]. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4\(63\).80-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.4(63).80-88)

National Bank of Ukraine. (n.d.). *Monetary policy decisions archive* [in Ukrainian]. [Національний банк України. (б.д.). *Архів монетарних рішень*]. <https://bank.gov.ua/ua/monetary/archive-rish>

Rudko, H. I., Karli, V. E., & Tolkunov, A. A. (2022). *Concept of sustainable development in subsoil use as a tool for the investment attractiveness of Ukraine's subsoil resources*. State Commission of Ukraine on Mineral Reserves. Bukrek [in Ukrainian]. [Рудько, Г. І., Карлі, В. Є., & Толкунов, А. А. (2022). *Концепція сталого розвитку в надрокористуванні як інструмент інвестиційної привабливості ресурсів надр України*. Державна комісія України по запасах корисних копалин. Букрек].

Savchuk, V. (2024). *Management under uncertainty: Business intelligence for executives*. Laboratoriya [in Ukrainian]. [Савчук, В. (2024). *Менеджмент в умовах невизначеності*. Business Intelligence для ТОПів. Лабораторія].

Shelikhov, S. V., & Masalska, O. O. (n.d.). *Scenario analysis as the methodological foundation of information security incident management* [in Ukrainian]. [Шеліхов, С. В., & Масальська, О. О. (б.д.). *Сценарний аналіз*

як методологічна основа керування інцидентами інформаційної безпеки]. [https://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/148761/1/masal\\_shelikhov.pdf](https://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/148761/1/masal_shelikhov.pdf)

Sivitska, S. P. (2014). Strategic directions for investment in alternative energy in the context of national economic development. *Youth Economic Digest*, 1(1), 76–80 [in Ukrainian]. [Сівіцька, С. П. (2014). Стратегічні напрями інвестування альтернативної енергетики в контексті розвитку національної економіки. *Молодіжний економічний дайджест*, 1(1), 76–80]. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/med\\_2014\\_1\(1\)\\_17](http://nbuv.gov.ua/UJRN/med_2014_1(1)_17)

Stehly, T., & Duffy, P. (2021). *2020 cost of wind energy review* [Technical report]. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP5000-81209. <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/81209.pdf>

Suprun, S. D., & Yukhymchuk, S. V. (2009). Assessment of the effectiveness of investment projects of enterprises. *Finance of Ukraine*, 4, 82–87 [in Ukrainian]. [Супрун, С. Д., & Юхимчук, С. В. (2009). Оцінка ефективності інвестиційних проектів підприємств. *Фінанси України*, 4, 82–87].

Tatarenko, N. O., & Poruchnyk, A. M. (2000). *Investment theories*. KNEU [in Ukrainian]. [Татаренко, Н. О., & Поручник, А. М. (2000). *Теорії інвестицій*. KHEU].

Tochenyi, V. A., Reztsov, V. F., & Tychynskyi, B. H. (2010). Modeling and cost analysis of electricity from a wind power station. *Energy: Economics, technologies, ecology*, 1, 3–10 [in Ukrainian]. [Точений, В. А., Резцов, В. Ф., & Тучинський, Б. Г. (2010). Моделювання і аналіз собівартості електроенергії вітрової електростанції. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, 1, 3–10].

Zurian, O. V. (2023a). Techno-economic and environmental analysis of implementing a geothermal heat pump system. *Ecological Sciences*, 5(50), 37–47 [in Ukrainian]. [Зур'ян, О. В. (2023). Техніко-економічний та екологічний аналіз впровадження геотермальної теплонасосної системи. *Екологічні науки*, 5(50), 37–47]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.6>

Zurian, O. V. (2023b). Techno-economic advantages of using open and modular hydrothermal heat pump systems. *Bulletin of the Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrohradskyi*, 4(141), 57–70 [in Ukrainian]. [Зур'ян, О. В. (2023). Техніко-економічні переваги використання відкритих та модульних гідротермальних теплонасосних систем. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 4(141), 57–70]. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.7>

Zurian, O. V., Levchenko, O. I., & Pidtilok, O. M. (2015). To the issue of accounting for uncertainty and risk in the geological-economic analysis and cost assessment of deposits. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 38–47 [in Russian]. [Зур'ян, О. В., Левченко, О. І., & Пидтилок, О. М. (2015). К вопросу учета неопределенности и риска в геолого-экономическом анализе и стоимостной оценке месторождений. *Минеральные ресурсы Украины*, 1, 38–47].

Отримано редакцією журналу / Received: 17.03.25

Прорецензовано / Revised: 31.03.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Олексій ЗУР'ЯН, д-р техн. наук

ORCID ID: 0000-0002-2391-1611

e-mail: alexey\_zuryan@ukr.net

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, Україна

Андрій ТОЛКУНОВ, канд. геол. наук

ORCID ID: 0000-0002-9904-9693

e-mail: schreibikus@ukr.net

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ, Україна

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Тетяна ОМЕЛЬЧЕНКО, канд. екон. наук, ст. наук. співроб., експерт

ORCID ID: 0009-0004-8097-5787

e-mail: omelchenko.t@gmail.com

Науково-дослідницький центр "ЕкоУкраїна" ГО Наукова установа "Цифрова агенція «Е-Екологія»", Київ, Україна

## ВРАХУВАННЯ РИЗИКУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ ОБ'ЄКТІВ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**Вступ.** Розглянуто комплексний підхід до оцінки ризиків, що впливають на інвестиційну привабливість проєктів у сфері геотермальної енергетики, як – сукупності різних об'єктивних передумов, можливостей і обмежень, що виникають у процесі залучення інвестицій у розвиток геотермальної енергетики, здатних створити умови для раціонального та ефективного використання наявних ресурсів (природних, людських, інформаційних, технологій, капіталу та ін.). Особливу увагу приділено локальним, регіональним та техніко-екологічним чинникам ризику.

**Методи.** В роботі використано методи, які поєднують фінансово-економічний аналіз, оцінку ризиків, технічну експертизу, вивчення нормативно-правового середовища та ринкових умов. Основою становить розрахунок фінансових показників, таких як чиста приведена вартість (NPV), внутрішня норма рентабельності (IRR), дисконтовані грошові потоки (DCF) та період окупності, що дають змогу оцінити потенційну дохідність проєкту. Технічна оцінка включає екологічну експертизу та аналіз сталості використання геотермального ресурсу, зокрема глибини залягання та температурного потенціалу. Водночас важливим є вивчення нормативно-правової бази щодо використання надр і тарифного регулювання. Такий підхід забезпечує обґрунтованість інвестиційних рішень і мінімізацію ризиків.

**Результат.** У ході дослідження запропоновано вдосконалену методичку оцінки ризиків інвестування в геотермальну енергетику, яка враховує комплексний аналіз взаємозв'язку локальних, регіональних і техніко-екологічних чинників. Також розроблено підхід до ранжування ризиків за ступенем впливу на ефективність проєкту та розроблено рекомендації щодо їх мінімізації. Запропоновані методи дають змогу підвищити точність прогнозування та обґрунтованість інвестиційних рішень у цій сфері.

**Висновки.** Аналітично обґрунтовано, що LCOE з корисуванням на ризики дозволяє врахувати всі можливі втрати та невизначеності, як NPV оцінює фінансову привабливість та допомагає визначити, чи варто інвестувати, також визначено, що урахування регіональних і локальних ризиків забезпечує більш реалістичну оцінку інвестування в геотермальну енергетику. Перспективним

напрямами подальших досліджень у цій галузі є розробка більш точних моделей оцінки ризиків із використанням сучасних цифрових технологій, зокрема машинного навчання та великих даних. Також важливим є вдосконалення методів екологічного моніторингу та розробка ефективних стратегій мінімізації техногенних ризиків. Дослідження впливу змін клімату на стабільність геотермальних ресурсів, а також вдосконалення законодавчої та нормативної бази для стимулювання інвестицій у галузь можуть сприяти сталому розвитку геотермальної енергетики.

**Ключові слова:** геотермальна енергетика, надрокористування, інвестиційна привабливість, ризики, відновлювана енергетика, екологічна безпека, управління ризиками, перспективи розвитку.

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 528.8

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.109.14>

Iryna STAKHIV<sup>1</sup>, PhD (Geol.), Assist.  
ORCID ID: 0009-0007-3090-6988  
e-mail: stakhivira@gmail.com

Vitalii ZATSEKOVNYI<sup>1</sup>, DSc (Engin.), Prof.  
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125  
e-mail: vitalii.zatsekovnyi@gmail.com

Mauro DE DONATIS<sup>2</sup>, PhD (Geol.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0002-9721-1095  
e-mail: mauro.dedonatis@uniurb.it

Tetiana PASTUSHENKO<sup>1</sup>, PhD (Phil.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0001-9826-5004  
e-mail: tatiana.v.pastushenko@gmail.com

Sofiya HORDIICHUK<sup>1</sup>, Student  
ORCID ID: 0009-0004-0231-8394  
e-mail: sophiahi2705@gmail.com

Tetiana MALIK<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0002-1362-8433  
e-mail: malik.tat@gmail.com

<sup>1</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine  
<sup>2</sup>University of Urbino Carlo Bo, Department of Pure and Applied Sciences, Urbino, Italy

## SPATIAL ANALYSIS OF THE FLOODED LAND AREA OF THE KHERSON REGION NATURE RESERVE USING REMOTE SENSING DATA

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

**Background.** The ongoing war in Ukraine has become the largest armed conflict in the world in the last decade, causing unprecedented destruction and devastation of the country's natural landscapes. The disaster caused by the explosion at the Kakhovka hydroelectric power station inflicted irreparable damage to the ecologically important and valuable lands of the Kherson region natural reserve. The aim of the work was to study the flooded land areas of the natural reserve of the Kherson region, Ukraine, which were affected by the collapse of the Kakhovka hydroelectric power station dam, using remote sensing data.

**Methods.** The paper highlights the features of using remote sensing (RS) for geoinformation modeling of the impact of the Kakhovka hydroelectric power station dam collapse on the lands of the Kherson region natural reserve. In addition, data from the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, Open Street Map, and Landsat 8 satellite images were used for the work. The method of geoinformation modeling in the QGIS, Sentinel Hub, and ArcGIS environments was used for data processing.

**Results.** The study found that more than 80 % of the area was flooded in half of the studied nature reserves (19). In this study, special attention was paid to the Nyzhniodniprovsky National Nature Park, which is the largest in area and is actually located on the front line. The area of flooding was 89 %, which indicates the extent of damage caused by the flooding. This paper describes the algorithm for processing geospatial data, Landsat. To analyze the changes that the park's landscapes have undergone, changes in vegetation indices were assessed.

**Conclusions.** The paper concludes that there is a pressing need for further monitoring and development of comprehensive measures for the rehabilitation of the affected areas. It is proposed to use the modeling results to plan measures for the protection and restoration of natural complexes affected by human-made disasters. These results will serve as the basis for further research, which will include studying the dynamics of changes in the state of the land areas of the nature reserve. This approach will allow a more accurate assessment of the consequences of the disaster event and the development of effective measures for the restoration and preservation of these lands.

**Keywords:** flooded lands, RSE, Kakhovka reservoir, nature reserve lands.

### Background

Armed conflicts and hostilities negatively impact the environment, infrastructure, and human lives. Modern wars have a greater impact on ecosystems than previous, less industrialized wars, due to the greater potential of modern weapons to cause environmental damage (Tignino, 2011). Consequences of war can manifest both directly, as damage to water resources and contamination by weapon residues, and indirectly, as increased frequency or intensity of destructive processes. Such processes can occur naturally, for example, erosion, or anthropogenically (e.g., industrial pollution). Water supply and treatment facilities, water distribution and sewage systems often become direct and indirect victims of war (Francis, 2011).

On February 24, 2022, Russia launched a full-scale invasion of Ukraine, an event that triggered unprecedented destruction and devastation of the country's natural

landscapes (Tomchenko et al., 2023). The Kherson region, like the country's other regions, faced enormous problems caused by the use of military force by the aggressor country. The south of Ukraine had long been known to suffer from a shortage of water resources, with the Kherson region being no exception. That is why, in the late 1950s, the Kakhovka Reservoir was created by constructing the Kakhovka Dam on the Dnieper in order to improve local water supply and meet the needs of agriculture, industry and energy.

In June 2023, however, the Russian occupation troops destroyed the Kakhovka Dam, using damage to civilian infrastructure as a weapon against Ukraine. This disastrous event has become a problem of special scientific interest, highlighted in numerous studies by researchers, ecologists, and public activists. The Kakhovka Dam destruction inflicted great damage to the region, affecting water management, agriculture, as well as the lands of the nature reserve, which



make an important component of the land cover in the Kherson region. Moreover, these lands are both a regional jewel and an attraction for tourists, which, in turn, have an impact on the economy of the region (Afanasyev, 2023).

The impact of the Kakhovka hydropower plant (HPP) demolition on the lands of the Kherson region is a major issue because land is an important natural resource of the country; therefore, it is necessary to monitor and analyze changes in land use and land cover for territorial development planning, ensuring sustainable development, and preserving biodiversity (Vyshnevskiy et al., 2023).

One of the most adverse effects of warfare on land cover is the destruction or damage to agricultural lands, forests, water bodies, and other natural areas (Tsiupa, & Plichko, 2023). Military operations, the use of heavy weapons and explosive devices can lead to soil destruction, water pollution, and the destruction of forest cover (Strokal et al., 2023). Being an important natural resource, the lands of the nature reserve play a role in both regional and national economy, as well as contributing to the development of ecosystems and biodiversity of nature.

**Literature Review.** Floods are natural phenomena that are an integral part of the hydrological cycle. Most floods are caused by the interaction between extreme unexpected weather events and the geohydrological characteristics of the catchment (relief, land use, geomorphology, and human intervention). In order to fully understand the consequences of the explosion at the Kakhovka HPP and develop a system of measures for remedying them, one should carefully study the results of research on similar topics in other countries (Kastridis et al., 2021).

The experience gained by the colleagues from Brazil, who are investigating the problem of vegetation degradation in their study, is of great use to this research. They applied an improved method based on NDVI values obtained from satellite images and tested in the Uberaba River Basin Environmental Protection Area (Valle Júnior et al., 2019).

Flooding, in terms of its development dynamics and territorial distribution, is the most prevalent among exogenous geological processes in Ukraine. This is a complex process, which is characteristic mainly of economically developed territories. Flooding affects more than 2 thousand cities, towns, and rural settlements with a population of up to 16 million inhabitants. Flood threats have become particularly high in Mykolaiv (52 % of the total area of the region), Odessa (40 %), and Kherson (36 %). Among urbanized territories facing the greatest risk of flooding are the Dnipropetrovsk, Donetsk, Zhytomyr, and Odessa regions (Tymochko, 2009).

Of interest is also the method of assessing the benefits of a flood warning system, as well as the method of assessing flood hazard zones, which was applied to the Koyliaris River basin in Greece. The implementation of this idea may help to mitigate the adverse effects of flooding now that the water level of the Dnieper River is no longer stable after the collapse of the dam (Kourgialas, & Karatzas, 2011).

In recent years, world scientific publications have paid close attention to the topic of human-induced flood damage. In papers on water pollution due to infrastructure damage (Mason et al., 2011; Biswas, 2000), the authors report extensive damage to treatment facilities as an example of human-made disasters. For instance, in Afghanistan, the irrigation system was seriously damaged during military operations, which resulted in the loss of viable agricultural land and biodiversity, and is still contributing to the loss of livelihoods and food security (Hussona, 2019).

In a recent paper on a flood disaster caused by a dam failure (Latrubesse et al., 2020), the authors used Sentinel-1 and Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) imagery to determine the extent of the flooded areas. Analysis of satellite imagery, supported by field observations, showed that the flood inundated an area of ~46 km<sup>2</sup> of villages and farmland in the Wang Ngao River, a tributary of the Mekong River basin.

A study by Tavus et al. (2022) analyzed the extent of flooding and damage caused by the Sardoba Dam breach, which flooded parts of Uzbekistan and Kazakhstan. As a result of the dam breach, large areas were flooded, posing a serious threat to human lives, settlements and agricultural areas, the natural environment, etc. The authors recommended that a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data be applied for flood mapping.

Scientists from the Institute of Land Use of the NAAS, Ukraine (Dorosh et al., 2023) developed a methodology for determining the areas of flooded lands affected by the collapse of the Kakhovka HPP dam and the area downstream of the Kakhovka reservoir. The methodology involved the use of satellite imagery, geoinformation technologies, and artificial intelligence technologies. The study results showed that the total area of flooding, according to ESA WorldCover land cover classes, was about 65 thousand hectares.

Another paper (Vyshnevskiy et al., 2023) examined the flooding of large areas caused by the Kakhovka dam destruction, including numerous settlements, agricultural lands, and natural ecosystems. The authors concluded that the collapse of the dam would lead to a shutdown of water supply to irrigation systems, which, in turn, would have a catastrophic impact on agriculture in southern Ukraine.

A study conducted by Magas et al. (2023) also analyzed the hydrological conditions of the Dnieper-Bug estuary region deriving from the collapse of the Kakhovka HPP dam and assessed its impact on the water resources and territories of Ukraine's southern regions. The major resulting hydrological phenomena observed included flooding of territories, destruction of civil infrastructure, residential buildings and households in the settlements, industrial and agricultural facilities, restriction of access to drinking water, deterioration of the ecological and epidemiological situation, destruction of the top soil, damage to vegetation, destruction of unique biodiversity, and loss of human lives.

The impact of military operations on freshwater resources and water infrastructure during the first three months of the war in Ukraine was analyzed in a paper by Shumilova et al. (2023), whose results showed that much of the water infrastructure, such as dams on reservoirs, water supply and water purification systems, and underground mines, were damaged or are currently under threat from military operations. A number of papers revealed major negative effects of military operations on the state of water bodies and their quality (Strokal, & Kovpak, 2022; Khan, 2022). Although considerable amount of research has been devoted to human-made flooding events, few attempts have been made to analyze the long-term effects of the Kakhovka HPP accident on the lands of the Kherson region nature reserve.

**The purpose** of the study is to investigate the lands of the Kherson region nature reserve flooded as a result of the explosion at the Kakhovka hydroelectric power station, using remote sensing data.

**The object** of the study is the lands of the nature reserve of the Kherson region, Ukraine.

The Kherson region nature reserve includes natural territories and objects (biosphere reserves, national natural parks, reserves) and artificially created objects (botanical

gardens, dendrological and zoological parks, and monuments of landscape art). These objects, depending on their ecological, historical, cultural and scientific value, are of national or local importance (Ministry of Environmental Protection..., 2020).

#### Methods

To achieve this goal, Landsat 8 satellite images taken on June 9, 2023 were used. One of the best ways to determine the area of flooding is to calculate the Normalized Difference Water Index (NDWI), proposed by McFeeters in 1995. The NDWI relies on the contrast between reflected near-infrared and visible green light to enhance the presence of these water bodies, effectively minimizing the visibility of soil and terrestrial vegetation features (McFeeters, 1995).

To determine the condition of the park after the dam breach, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was used:

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$$

The result produced by the formula is a value ranging from -1 to +1. If reflectance is low (or values are low) in the red channel and high in the NIR channel, this will generate a high NDVI value, and vice versa. In general, the NDVI is a

standardized way to measure healthy vegetation. High NDVI values are indicative of healthier vegetation. On the contrary, low NDVI values are associated with lower density or lack of vegetation (EOS Data Analytics, 2022).

The next step was to convert the raster data (the NDWI index) to vector. For each polygon of the created vector, the corresponding value of the source class or each pixel of the raster is recorded in the attribute table (Raster to Polygon, 2021) (Fig. 1).

In addition, in this study, we used data from the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine on the ecological state of the territories of the Kherson region for 2020, which provides a detailed account of the composition and area of the NPF lands. The actual area of the NPF lands as of 2020 was obtained from the environmental passport of the Kherson region (Ministry of Environmental Protection..., 2020). Data from the Open Street Map cartographic portal was used to overlay the NPF layer on satellite images. The method of geoinformation modeling in the QGIS, Sentinel Hub, ArcGIS environment was used to process the data.

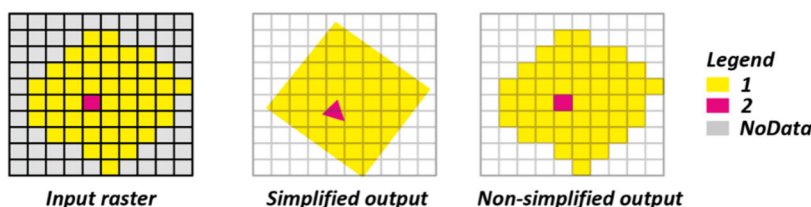


Fig. 1. Raster to vector conversion with various simplified settings

#### Results

Figure 2 presents a classified (reduced) NDWI Landsat 8 image as of June 9, 2023, i.e. the day when the flood reached peak values. It was found that the most flooded areas were those located on the left bank of the Dnieper River, in the area of Hola Prystan. Furthermore, the expansion of the Inhulets River bed became noticeable, which in turn led to an increase in water levels in the villages of Inhulets, Ulyanivka, Darivka, and Yasna Polyana (Fig. 2).

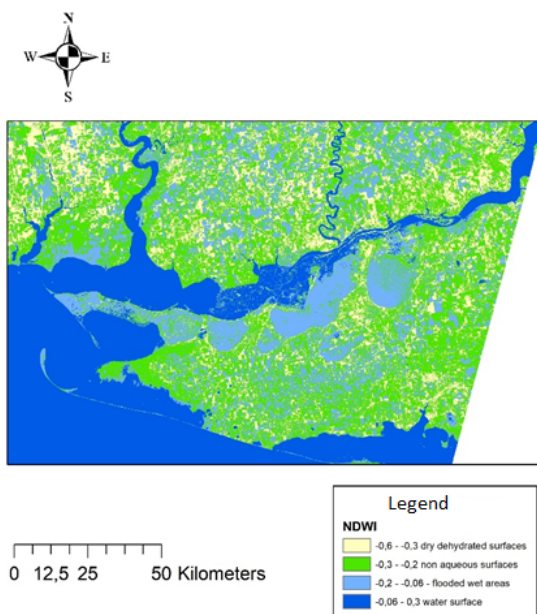


Fig. 2. NDWI water index of the flooded area according to Landsat 8 images as of June 09, 2023

To identify the lands of the nature reserve that were affected by flooding, Landsat 8 images were downloaded, the NDWI index was converted into vector format, after which the intersection of the NDWI layer and the reserve layer was found using ArcGIS tools. The next step in the analysis of the obtained data and Open Street Map data was to calculate the area of the flooded reserve lands (Table 1).

Table 1 presents the effects of the explosion at the Kakhovka HPP on the areas of land of the Kherson region nature reserve. The landmarks that suffered the most severe damage from flooding included: the Tsiurupynskyi Sosnovyi Bir ("Pine Forest") protected area of local importance, 95 % of which was flooded; Kozatske Dzherelo, a hydrological natural monument of local importance – 89 %; the part of Hopry Lake hydrological monument of local importance – 97 %; Bilozerski Dzherela, a hydrological monument of local importance – 94 %; and Ozero Solyane ("Salt Lake") Hydrological Reserve of national importance – 97 %. Among the least affected areas, on the other hand, were the Korsunskyi General Zoological Reserve of local importance and Hopry Sanatorium Park, a park-monument of landscape art of local importance, with a flooded area of 18 % and 14 %, respectively. These data indicate a number of serious issues caused by the dam collapse, considering the importance of the lands of the Kherson region natural reserve for both the economy and the development of ecosystems and biodiversity of nature. As a result of the blast, rare ecosystems have been lost, and a large number of rare plant and animal species inhabiting the reserve are under threat of extinction.

Figure 3 shows a map of the location of the objects of the Kherson region nature reserve where the area of flooding was more than 85 %.

Table 1

Comparison of land areas of the Kherson region natural reserve fund before and after flooding

| №  | Name of the object                                                                                 | Area, ha  | Area of inundation, ha | %, flooding |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------|-------------|
| 1  | Aleksandrivskiy Landscape Reserve, of national importance                                          | 989.827   | 626.44                 | 63          |
| 2  | Shiroka Balka Botanical Reserve, of local importance                                               | 114.312   | 95.3                   | 83          |
| 3  | Sophiivskiy Botanical Reserve, of local importance                                                 | 204.074   | 161.811                | 80          |
| 4  | Inguletskyi lyman ("Estuary") Botanical Reserve, of local importance                               | 50.022    | 37.584                 | 75          |
| 5  | Korsunskiy General Zoological Reserve, of local importance                                         | 3,390.228 | 619.179                | 18          |
| 6  | Bakaitskiy Zholob General Zoological Reserve, of local importance                                  | 1,627.117 | 1,010.714              | 62          |
| 7  | Bobrove Ozero ("Beaver Lake") Landscape Reserve, of local importance                               | 49.351    | 43.631                 | 88          |
| 8  | Tsiurupynskiy Sosnovyi Bir ("Pine Forest") Protected Tract, of local importance                    | 284.77    | 269.90                 | 95          |
| 9  | Ponyativske Poselennya Zmii ("Snake Settlement") Zoological Natural Monument, of local importance  | 5.613     | 3.758                  | 67          |
| 10 | Krynivske Poselennya Bobriv ("Beaver Settlement") Zoological Natural Monument, of local importance | 5.758     | 2.848                  | 49          |
| 11 | Kozatske Dzherelo Hydrological Natural Monument, of local importance                               | 0.018     | 0.016                  | 89          |
| 12 | Bilozerski Dzherela ("Springs") Hydrological Natural Monument, of local importance                 | 0.039     | 0.037                  | 94          |
| 13 | Part of Hopry Lake Hydrological Natural Monument, of local importance                              | 5.009     | 4.858                  | 97          |
| 14 | Shaby Botanical Reserve, of local importance                                                       | 20.33     | 18.311                 | 90          |
| 15 | Nyzhniodniproviskiy National Nature Park                                                           | 82,850.50 | 73,955.82              | 89          |
| 16 | Bakaitskiy Forest Reserve, of national importance                                                  | 411.797   | 188.35                 | 46          |
| 17 | Ozero Solyane ("Salt Lake") Hydrological Reserve, of national importance                           | 122.264   | 118.12                 | 97          |
| 18 | Hopry Sanatorium Park, park-monument of landscape art of local importance                          | 17.994    | 2.45                   | 14          |
| 19 | Stanislavskiy Landscape Reserve, of national importance                                            | 659.271   | 526.454                | 80          |

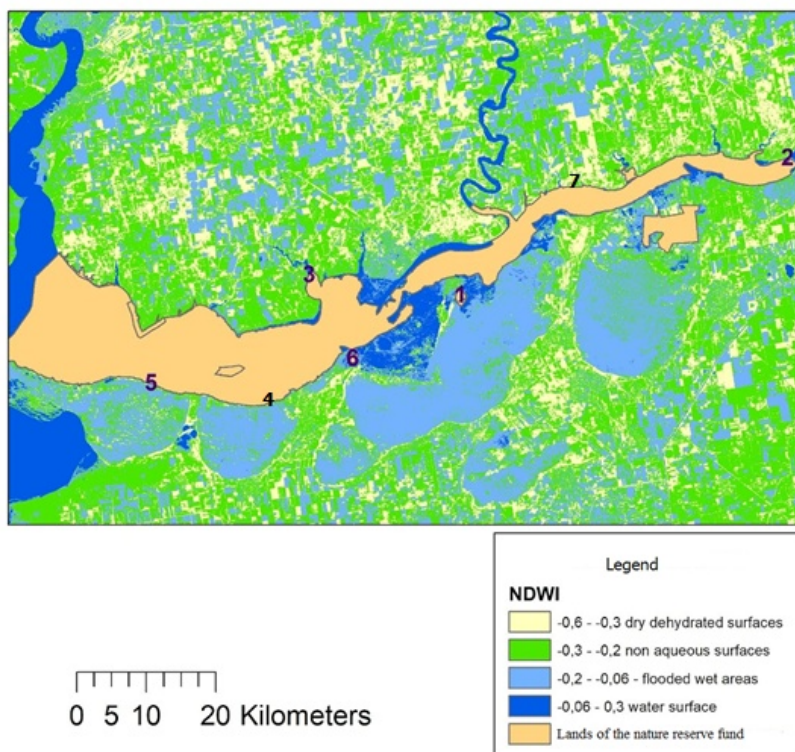


Fig. 3. Map of the nature reserve features with more than 85 % of the area flooded.

The map details the following nature reserve features marked with numbers:

- 1 – Tsiurupynskiy Sosnovyi Bir ("Pine Forest") Protected Tract of local importance;  
 2 – Kozatske Dzherelo Hydrological Natural Monument of local importance; 3 – Bilozerski Dzherela ("Springs") Hydrological Natural Monument of local importance; 4 – the part of Hopry Lake hydrological monument of local importance;  
 5 – Shaby Botanical Reserve of local importance; 6 – Ozero Solyane ("Salt Lake") Hydrological Reserve of national importance;  
 7 – Nyzhniodniproviskiy National Nature Park



In this paper, special emphasis is placed on the study of the Nyzhniodniprovskyi National Nature Park, which is the largest in area and is actually located on the current front line. There is no access to the territory, with the left bank still occupied by the enemy and the right bank recaptured. The river basin, with 50 islands in it, is the territory of the park, the direct combat zone where the front line passes. Hence, the use of remote sensing data is feasible (Hordiichuk et al., 2024).

The ecosystem of the national park suffered critical damage after the explosion of the dam at the Kakhovka HPP. In the first days after the explosion, the water rose by 6 meters 15 centimeters throughout the territory of the national park and all the living organisms that inhabited the

area, including the Red Book flora and ichthyofauna, were all washed away (Tomchenko et al., 2023). According to the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, the flooding of the territory destroyed the habitat of more than 1,000 species of flora and 1,140 species of fauna (Ministry of Environmental Protection, 2020).

Analysis of the data obtained revealed an area of 73,955.8 hectares of the park territory inundated. By contrast, before the dam destruction, the total park area measured 82,850.506 hectares. The percentage of flooding reached nearly 90%, which indicates the scale of the tragedy caused by Russia's military actions (Fig. 4).

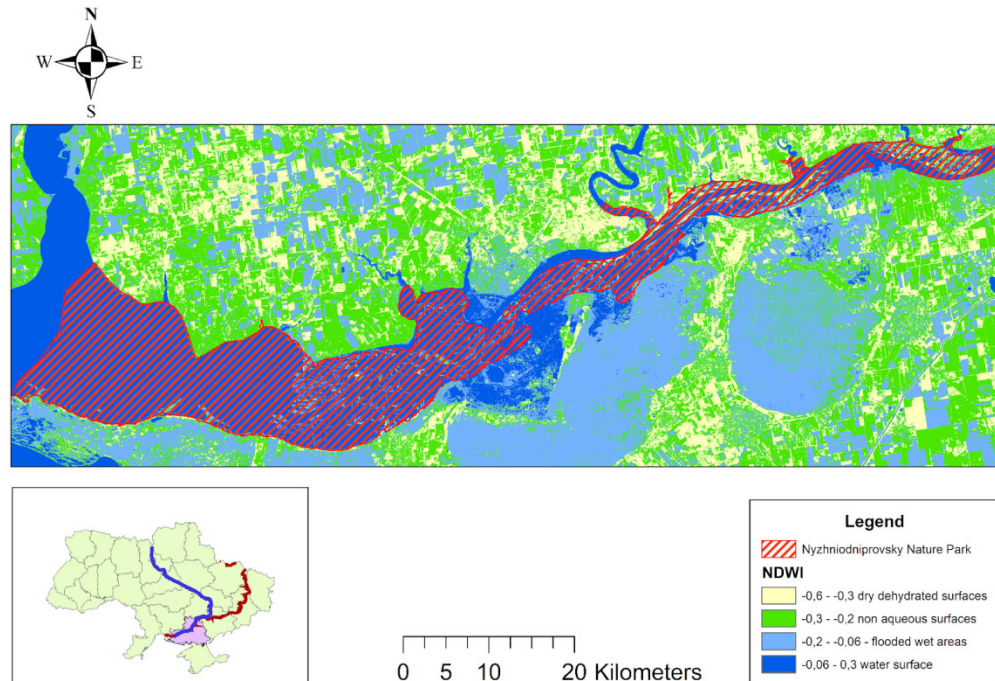


Fig. 4. Territory of the Nyzhniodniprovskyi National Nature Park (park territory and flooded area)

The next step was to study the change in the NDVI vegetation index values during the flood peak and after it (according to Landsat 8 data). To compare the index values, 15 dates closest to the flooding period were taken, of which 8 main ones were placed on the graph (Fig. 5).

Figure 5 shows uniform NDVI index values until June 3, 2023, which show little fluctuation within the period. However, after June 8, 2023, a rapid decrease in the index value is

noticeable, which may indicate the flood peak. After that, the index values begin to increase, showing slight fluctuations. This suggests that the water level became unstable, with a sudden increase on certain dates in some areas of the park. Therefore, the damage caused could be assessed as rather extensive. However, the graph shows that the NDVI values nearly reach the values observed before the accident. Thus, the park's ecosystem is gradually recovering.

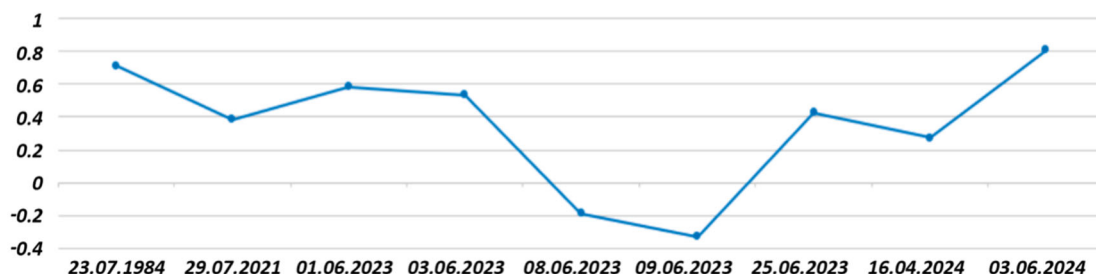


Fig. 5. Changes in NDVI values during and after the flood peak (based on Landsat 8 data)

Fig. 6 shows the dynamics of the NDVI index change before and after the accident. A significant decrease in the vegetation index values is observed. This may indicate extensive damage to vegetation due to flooding and a

subsequent decline in the groundwater level due to a drop in the water level in the Kakhovka reservoir. Thus, the areas that previously had a higher moisture regime are being drained.

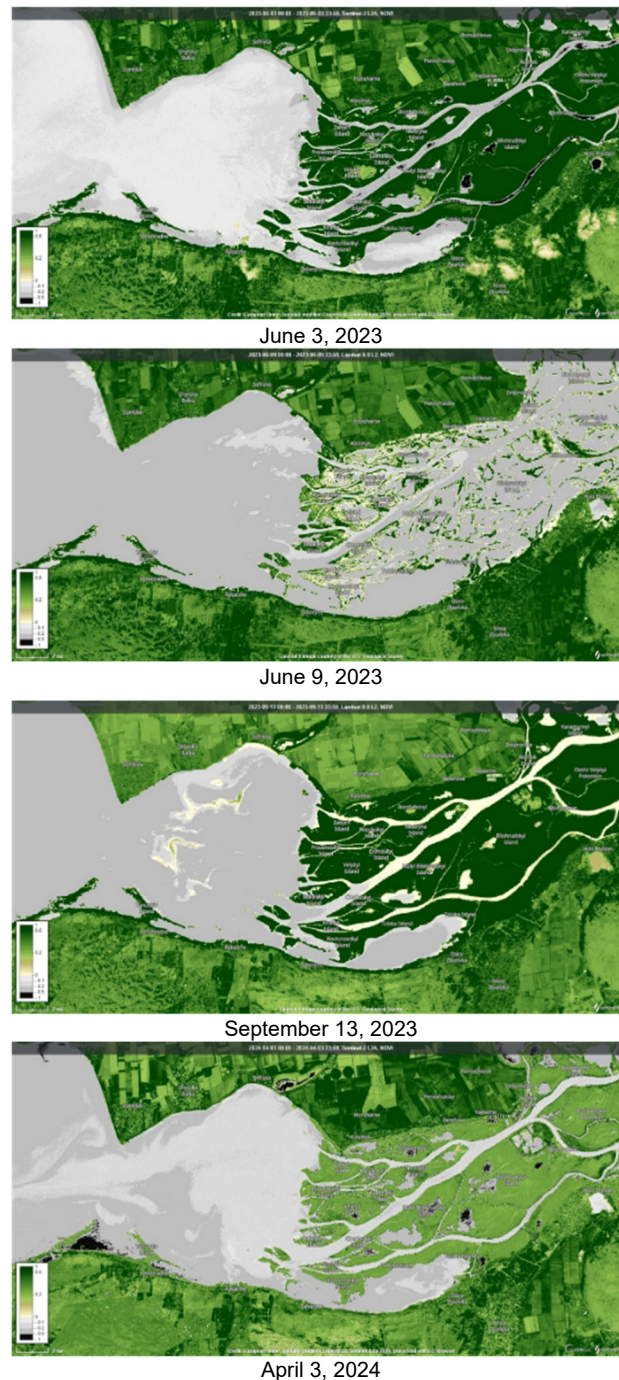


Fig. 6. NDVI index values obtained using Landsat 8 images

#### Discussion and conclusions

Using satellite images and geographic information systems (GIS), an analysis of changes in the state of the land areas of the Kherson region nature reserve after the destruction of the Kakhovka HPP was conducted. During the study, 19 nature reserve objects were analyzed, among which the most affected by flooding were the Tsiurupynskyi Sosnovyi Bir ("Pine Forest") protected area – 95 %; the Kozatske Dzherelo hydrological natural monument – 89 %, the Bilozerski Dzherela hydrological monument – 94 %, the part of Hopry Lake hydrological monument – 97 %, the Ozero Solyane ("Salt Lake") Hydrological Reserve – 97 %, and the Nyzhniodniprovskyi National Nature Park – 90 %.

In this study, special attention is paid to the Nyzhniodniprovskyi National Nature Park, due to the economic, natural, and cultural value of the protected area, the percentage of its affected area, and the park's having actually become the zone of combat. According to the results of the study, changes in the NDVI vegetation index values were observed during the peak flood period and after it, with the lowest index values recorded on June 8 and 9, 2023. However, since June 25, 2023, NDVI values have been increasing, which suggests that the park's ecosystem is gradually recovering.

The results obtained show the devastating impact of the Kakhovka Dam collapse on the local environment, which may lead to the disruption of ecosystems, loss of biodiversity



and natural resources, as well as a threat to the life and health of the local population.

To restore the damaged ecosystems and prevent similar tragedies in the future, a number of solutions suggested should include a detailed survey of the affected areas, the development of an ecological restoration plan, the provision of international assistance, and the strengthening of international law.

These results could make the basis for further research, which will focus on the dynamics of changes in the state of the lands of the nature reserves. This approach will ensure a more comprehensive assessment of the effects of the disastrous event on the lands and the development of effective measures for their restoration and preservation.

The flooding triggered by the dam destruction is also likely to have a detrimental impact on the coastal ecosystems. For example, the slopes of the Dnieper River valley may be eroded due to increased erosion activity and changes in the water flow regime. This can lead to soil erosion and damage to vegetation. The sudden rise in water levels led to the flooding of large areas of the floodplain, the destruction of vegetation and increased riverbank erosion. After the water recedes, the soils will be subject to erosion, salinization and pollution, which will lead to their degradation and a decrease in fertility for a long period.

Changes in the coastline of the Dnieper River and floodplain lakes, soil erosion, and other factors may reduce the attractiveness of the NNP and adjacent areas for recreation. However, an integrated approach to the restoration of these areas will allow creating new conditions adapted for ecotourism, bird watching, and other types of recreation on the site of the former floodplains.

A drop in prices for land plots adjacent to the National Nature Reserve may be predicted, as the areas that have been flooded or are subject to intense erosion tend to lose their value for recreation and construction. In addition, changes in the riverbed, water regime, erosion, bank redevelopment, instability of the level of surface and ground water will cause some areas to lose their commercial value. The destruction of infrastructure, such as roads, bridges, and communications, may reduce interest in purchasing land for commercial or residential purposes.

**Authors' contribution:** Iryna Stakhiv – conceptualization, formal analysis, methodology, writing (original draft); Vitalii Zatserkovnyi – conceptualization, data validation, writing (reviewing and editing); Mauro De Donatis – data validation, writing (reviewing and editing); Tetiana Pastushenko – writing (reviewing and editing); Sofiya Hordiichuk – formal analysis, data validation; Tetiana Malik – formal analysis, data validation.

## References

Afanasyev, C. O. (2023). About the Ecological Consequences of the Destruction of the Kakhovska HPP Dam: Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, September 6, 2023. *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine* 11, 71–80 [in Ukrainian]. [Афанасьєв, С. О. (2023). Про екологічні наслідки руйнування греблі Каховської ГЕС: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 6 вересня 2023 року. *Вісник НАН України*, 11, 71–80]. <https://doi.org/10.15407/vsn2023.11.071>

Biswas, A. K. (2000). Scientific assessment of the long-term environmental consequences of war. *The Environmental Consequences of War: Legal, Economic, and Scientific Perspectives* (pp. 303–315). <https://thirdworldcentre.org/wp-content/uploads/2020/07/RPP-Jan-3-00-Scientific-Assessment-of-the-Long-Term-Environmental-Consequences-of-War.pdf>

Dorosh, Y., Ibatullin, S., Dorosh, O., Sakal, O., & Dorosh, A. (2023). The use of geoinformation technologies in determining the area of flooded lands as a result of the destruction of the Kakhovskaya HPP dam. *Land management, cadastre and land monitoring*, 3, 98–109 [in Ukrainian]. [Дорош, Й. М., Ібатуллін, Ш. І., Дорош, О. С., Сакаль, О. В., & Дорош, А. Й. (2023). Застосування геоінформаційних технологій при визначенні площ

підтоплених земель унаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. *Землеустрій, кадастр і моніторинг земель*, 3, 98–109].

EOS Data Analytics (2022). <https://eos.com/>

Francis, R. A. (2011). The impacts of modern warfare on freshwater ecosystems. *Environmental Management*, 48(5), 985–999. <https://doi.org/10.1007/s00267-011-9746-9>

Hordiichuk, S., Chernov, A., Liashenko, D., & Stakhiv, I. (2024, October). Geoinformation Modelling of the Lower Dnipro National Nature Park Conditions as a Consequence of the Kakhovka Dam Destruction. *In International Conference of Young Professionals "GeoTerrace-2024"* (Vol. 2024, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510044>

Hussona, J. (2019). The reverberating effects of explosive violence on agriculture in Afghanistan. *Action on Armed Violence (AOAV)*. <https://aoav.org.uk/2019/the-reverberating-effects-of-explosive-violence-on-agriculture-in-afghanistan>

Kastridis, A., Theodosiou, G., & Fotiadis, G. (2021). Investigation of flood management and mitigation measures in ungauged NATURA protected watersheds. *Hydrology*, 8(4), 170. <https://doi.org/10.3390/hydrology8040170>

Kourgialas, N. N., & Karatzas, G. P. (2011). Flood management and a GIS modelling method to assess flood-hazard areas—a case study. *Hydrological Sciences Journal*, 56(2), 212–225. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.555836>

Khan, M. The Environmental Impacts of War and Conflict K4D Helpdesk Report (Institute of Development Studies, 2022). <https://doi.org/10.19088/K4D.2022.060>

Latrubesse, E. M., Park, E., Sieh, K., Dang, T., Lin, Y. N., & Yun, S. H. (2020). Dam failure and a catastrophic flood in the Mekong basin (Bolaven Plateau), southern Laos, 2018. *Geomorphology*, 362, 107221.

Magas, N. I., Khorenzhenko, G. V., Zamuruyeva, K. M., Beshevet, Y. V., Ryndyuk, S. I., Barkar, V. Yu., ... & Bondar, M. V. (2023). Analysis of the hydrological situation in the Dnipro-Buzka estuary region, as a result of the destruction of the Kakhovskaya HPP dam. *Environmental sciences*, 4(49), 15–25 [in Ukrainian]. [Магась, Н. І., Хоренженко, Г. В., Замуруєва, К. М., Бешевець, Ю. В., Риндюк, С. І., Баркар, В. Ю., ... & Бондар, М. В. (2023). Аналіз гідрологічної ситуації у Дніпровсько-Бузькій гірловій області, внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС. *Екологічні науки*, 4(49), 15–25].

Mason, M., Zeitoun, M., & El Sheikh, R. (2011). Conflict and social vulnerability to climate change: Lessons from Gaza. *Climate and Development*, 3(4), 285–297. <https://doi.org/10.1080/17565529.2011.618386>

McFeeters, S.K. (1995). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International journal of remote sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2020). Environmental passports [in Ukrainian]. [Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України (2020). *Екологічні паспорти*]. <https://mep.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichni-j-monitoring/ekologichni-pasporty/>

Raster to Polygon (2021). <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/conversion-toolbox/raster-to-polygon.htm>

Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A. et al. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nature Sustainability*, 6, 578–586. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>

Strokal, V. P., Berezhniak, Ye. M., Naumovska, O. I., Vagaliuk, L. V., Ladyka, M. M., Serbeniuk, G. A., Palamarchuk, S. P., Pavliuk, S. D. (2023). *The implications of the Russian-Ukrainian war on the state of natural resources in Ukraine*. Publishing Center of NUBiP of Ukraine, 2023 [in Ukrainian]. [Строкаль, В.П., Бережняк, Є.М., Наумовська, О.І., Вагалиук, Л.В., Ладика, М.М., Сербенюк, Г.А., Паламарчук, С.П., Павлюк, С.Д. (2023). *Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України*. Видавничий центр НУБіП України, 2023]. <https://dglb.nubip.edu.ua/server/api/core/bitstreams/32ec0615-2e20-462c-9c79-8836a26bf618/content>

Strokal, V., & Kovpak, A. (2022). Military conflicts and water: consequences and risks. *Ecological sciences: a scientific and practical journal*, 5(44), 94–102 [in Ukrainian]. [Строкаль В.П., Ковпак А.В. Военні конфлікти та вода: наслідки й ризики. *Екологічні науки: науково практичний журнал*, 5(44), 94–102]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.14>

Tavus, B., Kocaman, S., & Gokceoglu, C. (2022). Flood damage assessment with Sentinel-1 and Sentinel-2 data after Sardoba dam break with GLCM features and Random Forest method. *Science of The Total Environment*, 816, 151585.

Tignino, M. (2011). The right to water and sanitation in post-conflict peacebuilding. *Water International*, 36(2), 242–249. <https://doi.org/10.1080/02508060.2011.561523>

Tomchenko, O. V., Khyzhniak, A. V., Sheviakina, N. A., Zahorodnia, S. A., Yelistratova, L. A., Yakovenko, M. I., & Stakhiv, I. R. (2023). Assessment and monitoring of fires caused by the War in Ukraine on Landscape scale. *Journal of Landscape Ecology*, 16(2), 76–97. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0011>

Tomchenko, O., Magas, N., Yakovenko, M., & Stakhiv, I. (2023, November). Comparative Analysis of the Shallowing of the Kakhovska Reservoir Based on the Data of Rs (Remote Sensing). In *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2023, No. 1, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520147>

Tsiupa, I. & Plichko, L. (2023). Study of Dynamics of Changes in the Kakhovka Reservoir Based on Remote Sensing Data. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of*



the Environment (Nov. 2023, Vol. 2023, pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520170>

Tymochko, T. (2009). Land flooding as a threat to national interests. *All-Ukrainian Environmental League*. <https://www.ecoleague.net/pro-vel/misiia-vel/vystupypublikatsii/2009/item/53-pidtoplennia-zahroza-natsionalnym-interesam> [in Ukrainian]. [Тимочко, Т. (2009). Підтоплення земель, як загроза національним інтересам. Всеукраїнська екологічна ліга].

Valle Júnior, R. F. do, Siqueira, H. E., Valera, C. A., Oliveira, C. F., Sanches Fernandes, L. F., Moura, J. P., & Pacheco, F. A. L. (2019). Diagnosis of degraded pastures using an improved NDVI-based remote sensing

approach: An application to the Environmental Protection Area of Uberaba River Basin (Minas Gerais, Brazil). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 14, 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.001>

Vyshnevskyi, V., Shevchuk, S., Komorin, V., Oleynik, Y., & Gleick, P. (2023). The destruction of the Kakhovka dam and its consequences. *Water International*, 48(5), 631–647. <https://doi.org/10.1080/02508060.2023.2247679>

Отримано редакцією журналу / Received: 27.03.25

Прорецензовано / Revised: 10.04.25

Схвалено до друку / Accepted: 23.04.25

Ірина СТАХІВ<sup>1</sup>, канд. геол. наук

ORCID ID: 0009-0007-3090-6988

e-mail: stakhivira@gmail.com

Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.

ORCID ID: 0009-0003-5187-6125

e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Мауро ДЕ ДОНАТІС<sup>2</sup>, канд. геол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-9721-1095

e-mail: mauro.dedonatis@uniurb.it

Тетяна ПАСТУШЕНКО<sup>1</sup>, канд. філол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-9826-5004

e-mail: tatiana.v.pastushenko@gmail.com

Софія ГОРДІЙЧУК<sup>1</sup>, студент

ORCID ID: 0009-0004-0231-8394

e-mail: sophiahi2705@gmail.com

Тетяна МАЛІК<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0002-1362-8433

e-mail: malik.tat@gmail.com

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Університет Урбіно "Карла Бо", Урбіно, Італія

## ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПЛОЩ ПІДТОПЛЕНИХ ЗЕМЕЛЬ ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ ХЕРСОНСЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

**Вступ.** Війна, яка триває в Україні, стала найбільшим збройним конфліктом у світі за останнє десятиліття, що спричинив безпрецедентні руйнування та спустошення природних ландшафтів країни. Катастрофа, спричинена вибухом на Кakhovській ГЕС, завдала непоправної шкоди екологічно важливим і цінним землям природно-заповідного фонду Херсонської області. Метою роботи було дослідження площ підтоплених земель природно-заповідного фонду Херсонської області, що постраждали внаслідок руйнування дамби Кakhovської ГЕС за допомогою даних дистанційного зондування Землі.

**Методи.** Висвітлено особливості використання дистанційного зондування (ДЗ) для геоінформаційного моделювання впливу наслідків підриву дамби Кakhovської ГЕС на землі природно-заповідного фонду Херсонської області. Також для роботи використано дані Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Open Street Map, супутникові знімки Landsat 8. Для оброблення даних застосовано метод геоінформаційного моделювання в середовищі QGIS, Sentinel Hub, ArcGIS.

**Результати.** В ході дослідження встановлено, що понад 80 % площі затоплення зазнала половина із досліджуваних природно-заповідних об'єктів (19). В роботі особливу увагу приділено Національному природному парку "Нижньодніпровський", який є найбільшим за площею і фактично розташований на лінії бойового зіткнення. Площа затоплення склала 89 %, що говорить про шкоду, яку спричинило затоплення. У тексті описано алгоритм обробки геопросторових даних, Landsat. Для аналізу змін, що зазнали ландшафти парку, оцінено зміни вегетаційних індексів.

**Висновки.** В роботі зроблено висновок про необхідність подальшого моніторингу та розробки комплексних заходів з реабілітації постраждалих територій. Запропоновано використовувати результати моделювання для планування заходів із захисту та відновлення природних комплексів в умовах таких техногенних катастроф. Отримані результати стануть підґрунтям для подальших досліджень, що включатимуть вивчення динаміки змін стану площ земель природно-заповідного фонду. Такий підхід дасть змогу більш повно оцінити наслідки події та розробити ефективні заходи для відновлення та збереження цих земель.

**Ключові слова:** підтоплені землі, ДЗЗ, Кakhovське водосховище, природно-заповідний фонд.

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

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

Наукове видання



**ВІСНИК**  
**КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

**ГЕОЛОГІЯ**

**Випуск 2(109)**

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<sup>1/8</sup>. Обл.-вид. арк. 14,4. Ум. друк. арк. 13,02. Наклад 300. Зам. № 225-11392.  
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл2.  
Підписано до друку 28.04.25

Видавець і виготовлювач  
ВПЦ "Київський університет"  
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030  
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; (38044) 239 31 28  
e-mail: vpc@knu.ua; vpc\_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua  
http: vpc.knu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02