

УДК 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106>

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	Вижва Сергій, д-р геол. наук, проф. (Україна) Албані Абдер Ель, д-р філософії, проф. (Франція); Артеменко Геннадій, д-р геол. наук, проф. (Україна); Бахмутов Володимир, д-р геол. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Бондар Ксенія, д-р геол. наук (Польща); Веснавер Альдо, д-р філософії, проф. (Італія); Вижва Зоя, д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); Діндароглу Тургай, д-р філософії, проф. (Туреччина); Де Донатіс Мауро, д-р філософії, доц. (Італія); Дубина Олександр, д-р геол. наук, доц. (Україна); Загнітко Василь, д-р геол.-мінералог. наук, проф. (Україна); Зацерковний Віталій, д-р техн. наук, проф. (Україна); Зенг Квінглі, д-р філософії (Китай); Іванік Олена, д-р геол. наук, проф. (Україна); Івахненко Олександр, д-р філософії, проф. (Казахстан); Карпенко Олексій, д-р геол. наук, проф. (Україна); Коронеос Антоніс, д-р філософії, проф. (Греція); Корчагін Ігнат, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Кошляков Олексій, д-р геол. наук, проф. (Україна); Курило Марія, д-р геол. наук, доц. (Україна); Лі Циншен, д-р філософії, проф. (Китай); Лозицький Всеволод, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Маслов Борис, д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); Меньшов Олександр, д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. ред.) (Україна); Митрохин Олександр, д-р геол. наук, проф. (Україна); Михайлов Володимир, д-р геол. наук, проф. (Україна); Міліневський Геннадій, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Мірончук Тетяна, канд. філол. наук, доц. (Україна); Нестеровський Віктор, д-р геол. наук, проф. (Україна); Огар Віктор, д-р геол. наук, проф. (Україна); Олівія Марк, д-р філософії, проф. (Португалія); Орлюк Михайло, д-р геол. наук, проф. (Україна); Пастушенко Тетяна, канд. філол. наук, доц. (Україна); Перейра Пауло, д-р філософії, проф. (Литва); Портнов Василь, д-р філософії, проф. (Казахстан); Спассов Сімо, д-р філософії, проф. (Бельгія); Шабатура Олександр, д-р геол. наук, доц. (заст. голов. ред.) (Україна); Шевченко Олексій, д-р геол. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Шевчук Віктор, д-р геол.-мінералог. наук, проф. (Україна); Шмідт Волькмар, д-р філософії, проф. (Німеччина); Шнюков Сергій, д-р геол. наук, доц. (Україна)
Адреса редколегії	ННІ "Інститут геології" вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022 ☎ (38044) 521 33 38 e-mail: geology.bulletin@knu.ua; geolvisnyk@ukr.net web: https://geology.bulletin.knu.ua/
Затверджено	вченою радою ННІ "Інститут геології" 30.08.24 (протокол № 1)
Зареєстровано	Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення Рішення № 1089 від 28.03.24 Ідентифікатор друкованого медіа: R30-03800
Атестовано	Міністерством освіти і науки України (категорія А) Наказ № 1412 від 18.12.18
Індексування	Web of Science (квартиль 4, імпакт фактор 0.3), Research Bib, Google Scholar, Crossref
Засновник та видавець	Київський національний університет імені Тараса Шевченка Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет" Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1103 від 31.10.02
Адреса видавця	ВПЦ "Київський університет" б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601 ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28 e-mail: vpcc@knu.ua

BULLETIN

TARAS SHEVCHENKO NATIONAL UNIVERSITY OF KYIV

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

GEOLOGY

3(106)/2024

Established in 1958

UDC 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106>

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

EDITOR-IN-CHIEF	Vyzhva Sergiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine)
EDITORIAL BOARD	Albani Abderrazak El, PhD, Prof. (France); Artemenko Gennadiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Bakhmutov Volodymyr, DSc (Geol.), Senior Researcher (Ukraine); Bondar Kseniia, DSc (Geol.) (Poland); Dindaroğlu Turgay, PhD, Prof. (Turkey); De Donatis Mauro, PhD, Assoc. Prof. (Italy); Dubyna Oleksandr, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Ivakhnenko Oleksandr, PhD, Prof. (Kazakhstan); Ivanik Olena, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Karpenko Oleksiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Korchagin Ignat, DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); Koroneos Antonis, PhD, Prof. (Greece); Koshliakov Oleksiy, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Kurylo Mariia, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Liu Qingsheng, PhD, Prof. (China); Lozitsky Vsevolod, DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); Maslov Borys, DSc (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); Menshov Oleksandr, DSc (Geol.), Senior Researcher (Executive Editor) (Ukraine); Milinevskiy Gennadiy, DSc (Phys. & Math.), Senior Researcher (Ukraine); Mironchuk Tatyana, PhD (Philol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Mykhailov Volodymyr, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Mytrokhin Oleksandr, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Nesterovskiy Viktor, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Ogar Viktor, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Olivia Marc, PhD, Prof. (Portugal); Orliuk Mykhailo, DSc (Geol.), Prof. (Ukraine); Pastushenko Tatyana, PhD (Philol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Pereira Paulo, PhD, Prof. (Lithuania); Portnov Vasyl, PhD, Prof. (Kazakhstan); Schmidt Volkmar, PhD, Prof. (Germany); Shabatura Oleksandr, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Deputy Editor-in-Chief) (Ukraine); Shevchenko Oleksiy, DSc (Geol.), Senior Researcher (Ukraine); Shevchuk Viktor, DSc (Geol. & Mineral.), Prof. (Ukraine); Shnyukov Sergiy, DSc (Geol.), Assoc. Prof. (Ukraine); Spassov Simo, PhD, Prof. (Belgium); Vesnaver Aldo, PhD, Prof. (Italy); Vyzhva Zoya, DSc (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); Zacerkovniy Vitaliy, DSc (Tech.), Prof. (Ukraine); Zagnitko Vasyl, DSc (Geol. & Mineral.), Prof. (Ukraine); Zeng Qingli, PhD (China)
Address	USI "Institute of Geology" 90, Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 ☎ (38044) 521 33 38 e-mail: geology.bulletin@knu.ua , geolvisnyk@ukr.net web: https://geology.bulletin.knu.ua/
Approved by	the Academic Council of the USI "Institute of Geology" 30.08.24 (protocol № 1)
Registered by	the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine Decision № 1089 of 28.03.24 Identifier of printed media: R30-03800
Certified by	the Ministry of Education and Science of Ukraine (category A) Order № 1412 dated 18.12.18
Indexing	Web of Science (Quartile 4, Impact Factor 0.3), Research Bib, Google Scholar, Crossref
Founded and published	Taras Shevchenko National University of Kyiv Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University" Certificate of entry into the State Register ДК № 1103 dated 10.31.02
Address	PPC "Kyiv University" 14, Taras Shevchenko blvd., Kyiv, 01601 ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 58, 239 31 28 e-mail: vpc@knu.ua

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

ЗМІСТ

ГЕОФІЗИКА

МЕНЬШОВ Олександр, БОНДАР Ксенія, БАХМУТОВ Володимир, ГЛАВАЦЬКИЙ Дмитро, ПОЛЯЧЕНКО Євген Магнітно-мінералогічні властивості ґрунтів Київщини, уражених військовими діями.....	5
ТИЩЕНКО Андрій, ВИЖВА Андрій, МЕЛЬНИК Леонід, ТЕНАНДЕР Йонас Фагерлі, КІТТЕЛЛ Ларс-Ерік, ХЕЛЬГЕБОСТАД Крістіан Сварва Сучасна сейсмічна 3D-зйомка й оброблення даних на надмалих глибинах у північно-західній частині Чорного моря	13
АХМЕДОВ Тофік, ХАЛІЛОВА Лала Будова та літо-фаціальні особливості відкладів калакської свити Зих-Говсанської площі за 3D-даними сейсморозвідки та каротажу	19
КРУГЛОВ Богдан, ЛЕВОНЮК Сергій, ЮРАС Святослав, КАРПЕНКО Іван Огляд візейських колекторів нетрадиційного типу Дніпровсько-Донецької западини та порівняння з Північноамериканськими нетрадиційними формаціями	28
РУСАЧЕНКО Наталія, ПАСТУШЕНКО Тетяна, ВИЖВА Сергій Моделювання соляно-купольних структур у глибинному домені з використанням трасування променів та аналізу сейсмічних атрибутів.....	42

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

МИХАЙЛОВ Володимир Високоперспективні об'єкти мінерально-сировинної бази України. Частина 2. Неметалічні корисні копалини.....	47
ЛУКОМСЬКИЙ Владислав, КУРИЛО Марія Гірничо-геологічні передумови ефективної розробки родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини в межах поширення льодовикових відкладів	57
ЛИТВИНЮК Станіслав Практичне застосування методики переведення та зіставлення різних класифікаційних систем оцінювання мінеральних ресурсів на прикладі вітчизняних родовищ графіту та міді.....	62

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

КОШЛЯКОВА Тетяна, КОШЛЯКОВ Олексій Зміни хімічного складу питних підземних вод Херсонського родовища за даними тривалих спостережень у довоєнні часи	69
ГУСЕЙНОВ Джамал, ТАГІЄВ Аллахверді Характеристика впливу змін клімату на температуру повітря на території Азербайджану в період глобальних кліматичних змін.....	76
НІМЕЦЬ Олександр, НІМЕЦЬ Дмитро, ЧОМКО Дмитро, УДАЛОВ Ігор Особливості гідрогеологічних і термобаричних умов Валюхівського нафтогазоконденсатного родовища	83

ГЕОІНФОРМАТИКА

ВИЖВА Зоя, ДЕМИДОВ Всеволод, ВИЖВА Андрій Статистичне моделювання даних у 3D області з "кубічною" кореляційною функцією на прикладі геофізичного моніторингу Рівненської АЕС	90
ЗАЦЕРКОВНИЙ Віталій, ДЕ ДОНАТІС Мауро, ПЛІЧКО Людмила, САХНЮК Станіслав, ОДАРЧУК Наталія, МІРОНЧУК Тетяна Використання технологій дистанційного зондування для моніторингу міських островів тепла	99

CONTENTS

GEOPHYSICS

MENSHOV Oleksandr, BONDAR Kseniia, BAKHMUTOV Volodymyr, HLAVATSKYI Dmytro, POLIACHENKO Ievgen Magnetic mineralogical properties of Kyiv region soils, affected by war	5
TYSHCHENKO Andrii, VYZHVA Andrii, MELNYK Leonid, TEGNANDER Jonas Fagerli, KITTELL Lars-Erik, HELGEBOSTAD Kristian Svarva State-of-the-art 3D acquisition and imaging in ultra-shallow water in the northwestern part of the Black Sea	13
AKHMEDOV Tofik, KHALILOVA Lala Structure and litho-facial features of the qala suite deposits of the Zyk-Hovsan area according to 3D seismic and well logging data	19
KRUHLOV Bohdan, LEVONIUK Serhii, IURAS Sviatoslav, KARPENKO Ivan Review of viscan unconventional reservoirs within Dnipro-Donets depression and comparison to North American unconventional formations	28
RUSACHENKO Natalia, PASTUSHENKO Tetiana, VYZHVA Serhii Salt-dome structures modeling in depth domain using ray tracing and seismic attribute analysis	42

MINERAL RESOURCES

MYKHAILOV Volodymyr Highly prospective object of the mineral and raw material base of Ukraine. Part 2. Non-metallic minerals	47
LUKOMSKYI Vladyslav, KURYLO Mariia Geological and mining conditions for the effective development of construction and crushed stone deposits within the distribution of glacial sediments	57
LYTVYNIUK Stanislav Practical application of the methodology of conversion and comparison of different classification systems of assessment of mineral resources on the example of domestic graphite and copper deposits	62

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

KOSHIAKOVA Tetiana, KOSHIAKOV Olecsii Changes in the chemical composition of drinking groundwater of the Kherson deposit according to long-term observations in pre-war times	69
HUSEYNOV Jamal, TAGIYEV Allahverdi The changes of the air temperature characteristics in the Azerbaijan territory during global climate changes period	76
NIMETS Olexandr, NIMETS Dmytro, CHOMKO Dmytro, UDALOV Igor Features of hydrogeological and thermobaric conditions of the Vlachivske oil and gas condensate field	83

GEOINFORMATICS

VYZHVA Zoya, DEMIDOV Vselolod, VYZHVA Andrii The statistical simulation of dataset in 3D area with "cubic" correlation function on example Rivne NPP geophysical monitoring	90
ZATSERKOVNYI Vitalii, DE DONATIS Mauro, PLICHKO Liudmyla, SAKHNIUK Stanislav, ODARCHUK Natalia, MIRONCHUK Tetiana Using remote sensing technologies for monitoring urban heat islands	99

Олександр МЕНЬШОВ¹, д-р геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
e-mail: menshov@knu.ua

Ксенія БОНДАР^{1,2}, д-р геол. наук
ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Володимир БАХМУТОВ³, д-р геол. наук, проф., чл.-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Дмитро ГЛАВАЦЬКИЙ³, канд. геол. наук, ст. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
e-mail: hlavatskyi@gmail.com

Євген ПОЛЯЧЕНКО³, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
e-mail: poliachenkoib@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Інститут геофізики Польської академії наук, Варшава, Польща

³Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна Національної академії наук України, Київ, Україна

МАГНІТНО-МІНЕРАЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТІВ КІЇВЩИНИ, УРАЖЕНИХ ВІЙСЬКОВИМИ ДІЯМИ

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

Вступ. Одним із небезпечних впливів на довкілля, викликаних військовими діями в Україні, є деградація ґрунтового покриву, а саме його забруднення, перерозподіл генетичних горизонтів, ущільнення, зміна фізико-хімічних агрономічних показників тощо. Накопичений досвід показує, що більшість із цих процесів відображаються на магнітних властивостях ґрунтів.

Методи. Застосовано методіку магнітних досліджень, що передбачає повний спектр польових і лабораторних досліджень.

Результати. На основі розробленої діаграми для співвідношень ідеальної (безгістерезисної) магнітної сприйнятливості до низькочастотної магнітної сприйнятливості (χ_{ARM}/χ_{lf}) та ідеальної магнітної сприйнятливості до частотної залежності магнітної сприйнятливості (χ_{ARM}/χ_{fd}) було розбавлено дрібнозернисті магнітні частинки літогенного та бактеріального походження у ґрунтах дослідних ділянок Київщини. Для Старих Петрівців було ідентифіковано лише одну групу зразків. У Демидові виявили дві групи: більшу, позначену зеленим кольором, і меншу, позначену червоним. Нарешті, на ділянці дослідження Озера було визначено дві еквівалентні групи. За результатами термомагнітного аналізу магнітної сприйнятливості було ідентифіковано незвичний для ґрунтів "хвіст" після 600 °C, що вказує на вміст металевого заліза. Вміст важких металів у магнітній фракції ґрунтів з об'єктів військового ураження залежить від складу сплавів зброї, що вражає конкретне місце.

Висновки. Під час вибуху різних типів боєприпасів утворюються уламки неправильної форми через значний механічний вплив, а додаткове нагрівання в процесі призводить до утворення залізних сферул. Цей складний фізико-хімічний процес виникає внаслідок взаємодії високотемпературних газів, пилу та розплавленого металу. Зазначені об'єкти успішно ідентифікуються на основі експресних і дешевих магнітних методів.

Ключові слова: магнітна сприйнятливість, ґрунт, важкі метали, намагніченість, військові дії.

Вступ

Повномасштабне вторгнення в Україну завдає незворотного катастрофічного впливу на довкілля, зокрема забруднюючи та пошкоджуючи ґрунтовий покрив. Військові дії спричиняють не лише фізичне погіршення стану ґрунтів, а і їхнє хімічне забруднення. Пряме влучання снарядів, згоріла військова техніка та нафтопродукти руйнують екосистему, забруднюючи ґрунти і воду важкими металами та токсичними елементами. Основними джерелами хімічного забруднення ґрунтів є витікання палива та мастильних матеріалів з військової техніки, використання бойових хімічних речовин, (напалм, білий фосфор), вибухівка, що містить тротил і гексоген, а також токсичні речовини, які виділяються під час згорання боєприпасів і військової техніки. Ґрунти також забруднюються важкими металами, що потрапляють із залишками боєприпасів та військової техніки, серед яких алюміній (Al), кобальт (Co), миш'як (As), нікель (Ni), кадмій (Cd), мідь (Cu), хром (Cr), ртуть (Hg), цинк (Zn) та ін.

Накопичений досвід свідчить, що процеси деградації ґрунтового покриву, а саме його забруднення, перерозподіл

генетичних горизонтів, ущільнення, зміна фізико-хімічних агрономічних показників тощо, відображаються у магнітних властивостях ґрунтів (Salazar-Rojas, Cejudo-Ruiz, & Calvo-Brenes, 2024; Hu et al., 2022). Магнетизм ґрунтів залежить від вмісту магнітних мінералів (магнетиків) різного походження. У контексті впливу військових дій припускається наявність магнетиків ґрунтового (педогенного), антропогенного та техногенного (зокрема й військового впливу) походження. Отже, у пропонованій статті ми розглянемо саме магнітно-мінералогічний склад ґрунтів, що зазнали впливу військових дій, з метою пошуків зв'язків із деструктивними явищами у ґрунтах.

У зазначеному контексті на прикладах недавніх робіт розкриємо сучасний стан проблеми комплексування магнітних (напр., χ_{lf}) й інших (напр., ICP, pXRF) методів для вивчення забруднення ґрунтового покриву. Магнітні дослідження є цінним методом визначення просторового розподілу геохімічного забруднення ґрунту та повітря і забезпечують ідентифікацію антропогенної емісії небезпечних ультрадисперсних частинок (Bucko et al., 2011). Комбінація визначення елементного складу

методом ICP і магнітної сприйнятливості (χ f) характеризує структуру просторового забруднення і збагачення потенційно токсичними важкими металами (Cu, Zn, Pb, As, Sb, Cd і Hg). У південно-східній дельті Нілу (Guda et al., 2020) досліджували ґрунти поблизу промислових зон із рівнями забруднення, що значно варіюють, високою концентрацією у верхній частині ґрунту важких металів і явною тенденцією спадання у глибших шарах. Мультидоменні магнітні частинки вказують на внесення антропогенного матеріалу на звалища автомобільного брухту (Barbosa et al., 2020). Іншими словами, є всі підстави для залучення магнітних й інших методів з метою визначення рівня забруднення внаслідок військових дій.

Для ідентифікування мінералів заліза магнітні методи зазвичай супроводжуються результатами скануючої електронної мікроскопії (SEM) й енергодисперсійної спектроскопії (EDS) (Maity et al., 2021). Параметри магнітного гістерезису вказують на наявність у зразках крупнозернистих псевдоододомених (PSD) і багатодомених (MD) зерен магнетиту, що виникли внаслідок антропогенного забруднення (Menshov et al., 2023). Є багато робіт, у яких магнітну сприйнятливість використовують як наближену оцінку забруднення ґрунту важкими металами. Наприклад, високі та значні кореляції (0,41–0,89) між магнітною сприйнятливістю та концентраціями Fe, Zn та PLI були зареєстровані в Саксонії (Rachwał et al., 2017). Магнітні методи є ефективними для визначення рівня забруднення важкими металами й ідентифікування залізовмісних мінералів у вуличному пилю, що містить металеве залізо й карбід заліза (Górka-Kostrubiec et al., 2023). У роботі (Jordanova et al., 2021) за результатами кореляції між магнітною сприйнятливістю й індексом загального забруднення (PLI) визначено граничні показники магнітної сприйнятливості, що відповідають різним категоріям PLI. Цей підхід визнано успішним для моніторингу й картографування з високою просторовою та часовою роздільною здатністю. Для оцінювання рівня забруднення більшої частини міста Денізілі (Туреччина) було проведено багатовимірний статистичний аналіз (кластерний аналіз) й аналіз головних компонентів (PCA) та встановлено зв'язок між забрудненням важкими металами, величинами магнітної сприйнятливості та результатами флуоресцентного XRF-аналізу (Oudeika et al., 2020).

Важливим завданням є визначення джерела аномальних магнітних і геохімічних параметрів у ґрунтах як наслідок літогенного, педогенного чи техногенного забруднення. Результати (Szuszkiewicz et al., 2016) вказують, що співвідношення χ/Fe може бути надійним індикатором для визначення змін походження магнітного сигналу в профілях ґрунту. Чітке розуміння ризику для здоров'я ультрадисперсних частинок вимагає ідентифікування антропогенних зовнішніх джерел за геохімічним складом матеріалу пилю (Kelepertzis et al., 2019). Дані зі столичної зони Афін вказують на те, що антропогенні магнітні частинки, які утворюються внаслідок згоряння та вихлопних газів транспортних засобів, є надзвичайно поширеними.

Попередні результати поєднання магнітних і геохімічних методів, як універсальний інструмент для вивчення забруднення і зв'язку з військовими діями, нами були представлені в дослідженнях (Bondar et al., 2023; Menshov et al., 2024). Метою пропонованої роботи є порівняння результатів магнітних вимірювань і даних XRF для пілотної колекції зразків, зібраних на колишньому полі бою, місці ураження ракети та місці знищення нерозірваних боеприпасів на північ від Києва для виявлення забруднення, пов'язаного з війною.

Об'єкти дослідження. Досліджувана територія розташована на відстані 35–40 км північніше Києва, у межах Бучанського та Вишгородського р-нів Київської обл., на правому березі р. Дніпро (рис. 1). Найближчими населеними пунктами є села Демидів, Озера та Старі Петрівці. Значна частина цієї території вкрита лісами. Північно-західна частина Київської обл. має переважно рівнинний рельєф, розділений долинами річок, ярами та балками. Тут поширені лісові масиви, переважно хвойні та мішані. Регіон багатий на водні ресурси. Це, зокрема, річки (Дніпро, Ірпінь, Тетерів), озера та ставки. Полігон Демидів являє собою вирву від вибуху ракети в сосновому лісі, полігон Озера – пасовище поза дачними ділянками, полігон Старі Петрівці – місце знищення боеприпасів.

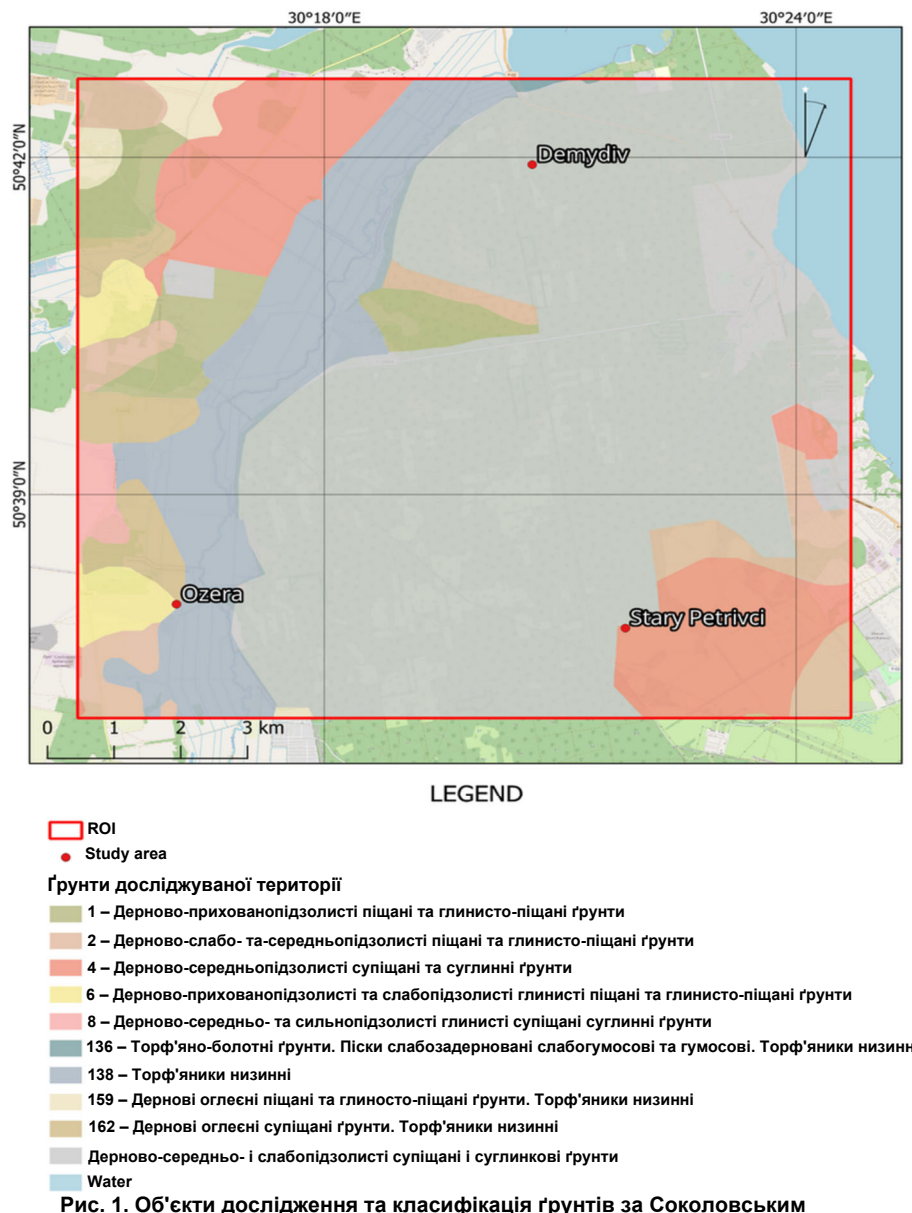
Ландшафтні умови є характерними для Поліської зони України. ґрунти переважно Umbric Albeluvisols Abruptic за класифікацією WRB (WRB, I. W. G., 2014). Клімат помірно-континентальний з теплим і вологим літом і м'якою зимою. Середньорічна температура +6,5...+7,5 °С. Річна кількість опадів становить 550...650 мм. Відповідно до кліматичної класифікації Кеппена, клімат досліджуваної території належить до зони Dfb (Lohmann et al., 1993), що означає помірно холодний (континентальний) клімат з температурою липня 18–23 °С, а січня: -10–0 °С.

За більш поширеною в Україні класифікацією ґрунтів Соколовського (див. рис. 1), північно-західна частина Київської обл. має різноманітний ґрунтовий покрив, зумовлений її географічним розташуванням, рельєфом і кліматичними умовами. Дерново-підзолисті ґрунти, що переважають на півночі та заході, відзначаються низькою родючістю та схильністю до ерозії. Опідзолені чорноземи, що зустрічаються в центральних і південних районах, більш родючі та менш схильні до ерозії. Лучно-чорноземні ґрунти, які характерні для долин річок, є дуже родючими. Піщані ґрунти характеризуються низькою родючістю та потребують унесення добрив. Торфово-болотні ґрунти зустрічаються в низинах і потребують осушення та вапнування. Тип ґрунту впливає на вибір сільськогосподарських культур, які можна вирощувати на цій території.

Під час захоплення Київської обл. частина досліджуваної території входила до окупованих територій (рис. 2).

Методи

Відбір проб ґрунту супроводжувався вимірюваннями польової об'ємної магнітної сприйнятливості за допомогою портативного капаметру РКМ-7. Питому магнітну сприйнятливість χ визначали в лабораторних умовах за допомогою MFK1-FB Carrbridge. Термоманітний аналіз магнітної сприйнятливості виконували за допомогою VLY5 Carrbridge з приставками CS4 і CS-L відповідно для високих (20–700 °С) і низьких (-195–0 °С) температур. Ізотермічна залишкова намагніченість насичення (M_{rs}) була отримана в полі 1 Тл за допомогою імпульсного магнітизатора MMPM10 (Magnetic Measurements, Велика Британія). Для вимірювання безгістерезисної залишкової намагніченості (ARM) використовували LDA5/PAM1 AF Demagnetizer (AGICO, Чехія) з максимальним змінним полем 100 мТл та SQUID (2G Enterprises, США). Далі було розраховано безгістерезисну магнітну сприйнятливість χ_{ARM} . Співвідношення χ_{ARM}/χ , M_{rs}/χ і ARM/M_{rs} використовуємо як чутливі до розміру зерна параметри. Високі значення вказують на відносно збагачення ододоменими (SD) частинками, тоді як низькі значення відповідають переважальним MD- та/або SP-частинкам. Детальніше методики магнітомінералогічних вимірювань наведено в роботах (Evans, & Heller, 2003; Maxbauer, Feinberg, & Fox, 2016).



Результати

Діаграма, наведена на рис. 3, запропонована для співвідношень χ_{ARM}/χ_{lf} та χ_{ARM}/χ_{fd} з метою ідентифікації дрібнозернистих магнітних частинок літогенного та біогенного походження (Oldfield, 1994). Для Старих Петрівців ідентифіковано лише одну групу зразків (зелений колір). Для Демидова ми виділили дві групи: більшу, позначену зеленим кольором, і меншу, позначену червоним кольором. Нарешті, дві еквівалентні групи були визначені на ділянці дослідження Озера.

Раніше закордонні вчені (Oldfield, 1994; Evans, & Heller, 2003) запропонували методику розбракування дрібнозернистих уламкових і бактеріальних мінералів у ґрунті (Menshov, 2018). Дослідники використали один набір зразків й успішно визначили дві групи, що представляють детритні та бактеріальні частинки. Щодо Старих Петрівців ми змогли виявити лише одну вибірккову групу (рис. 3). Це вказує на домінування одного магнітного фактора мінералоутворення (рис. 3 а). Ураховуючи особливості полігону Старі Петрівці ми висунули гіпотезу, що техногенні магнітні мінерали повинні бути результатом забруднення внаслідок знешкодження боеприпасів шляхом їхнього підриву.

Водночас виділення двох груп мінералів (позначені зеленим і червоним кольорами на рис. 3 б і 3 с) є свідченням того, що магнітні мінерали містять біогенний магнетит, отриманий із магнітотактичних бактерій (мікроаеробне середовище згідно з (Linford et al., 2005)), а також уламковий магнетит техногенного походження. Інтерпретування всіх зразків разом (рис. 3 d) є малоінформативним.

Для ідентифікування магнітних мінералів у ґрунтах були залучені дані терромагнітного аналізу (рис. 4). З метою підвищення інформативності дослідів нами було виділено магнітну фракцію з ґрунтів з усіх ділянок. У цьому досліді детальніше розглянемо результати для ділянки Старі Петрівці. Зміни магнітної сприйнятливості в діапазоні температур $-195-0^{\circ}\text{C}$ (низькотемпературний аналіз) були незначними, що характерно для дрібнозернистих оксидів заліза (Euge, & Shaw, 1994). Відсутність переходу Вервея (T_v) свідчить про відсутність стехеометричного магнетиту, що може бути наслідком маггемітизації (Ozdemir, & Dunlop, 2010), коли температура Вервея повністю пригнічується, або відбувається катіонна заміна, тобто на кривих перехід не спостерігаємо (Jackson, & Moskowitz, 2021).

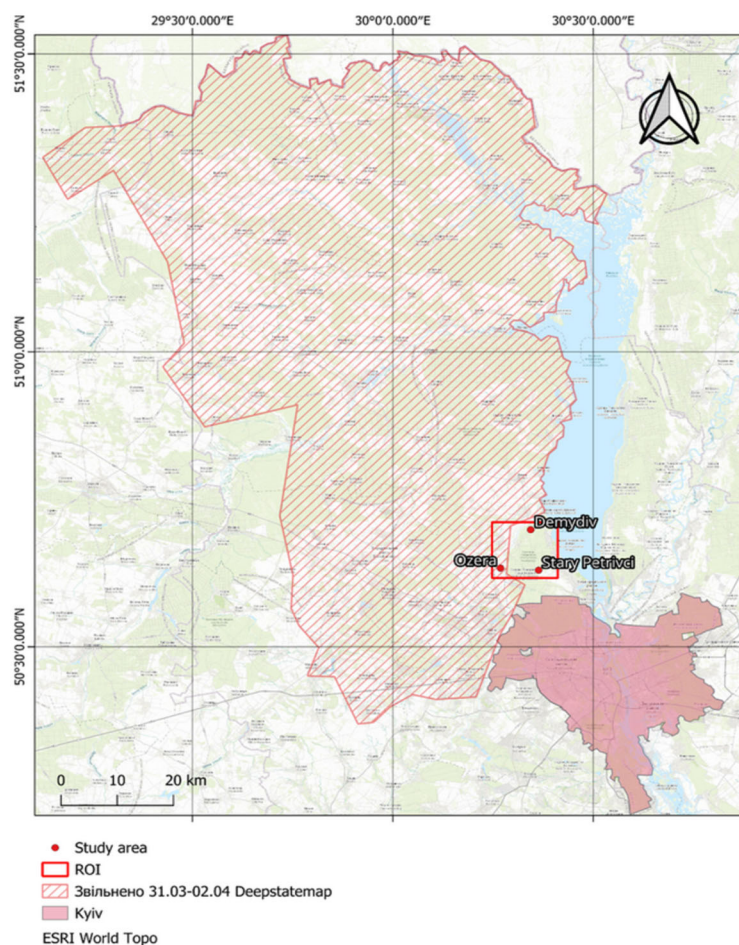


Рис. 2. Територія дослідження в контексті окупації за даними Deepstatemap

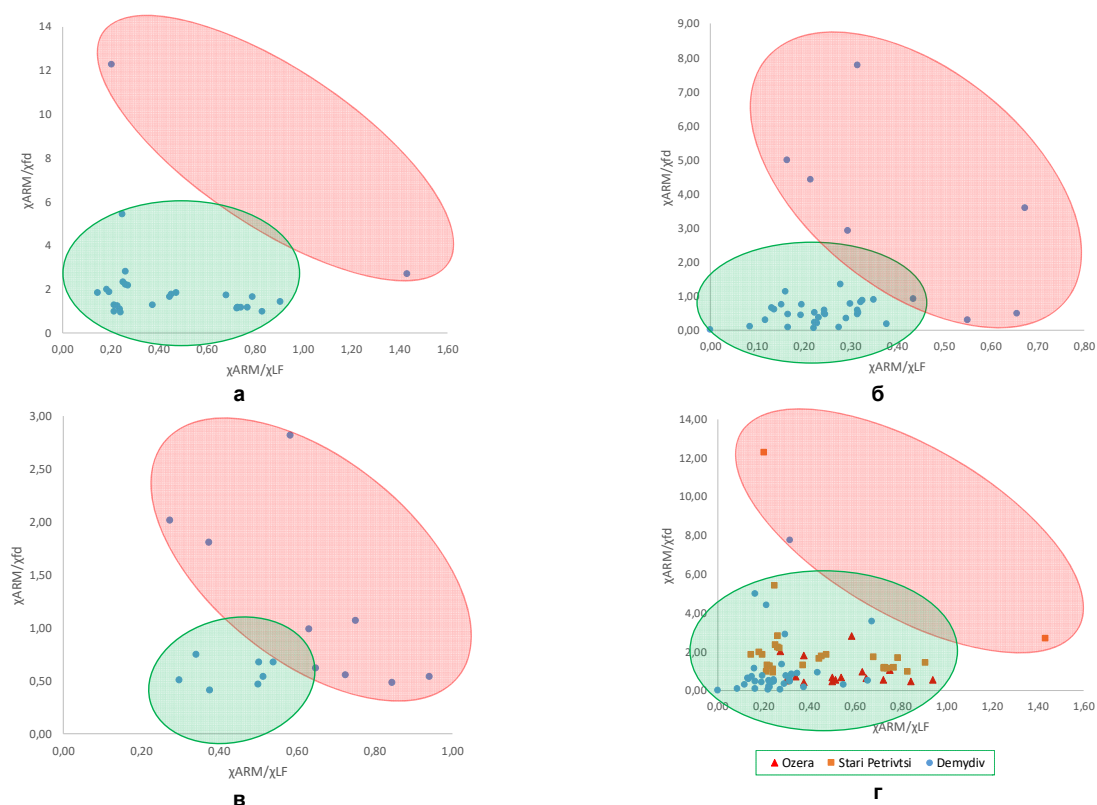


Рис. 3. Розрізнення магнітних частинок детритового та бактеріального походження за методикою (Oldfield, 1994): а) Старі Петрівці, б) Демидів, в) Озера, г) усі разом

Результати високотемпературного аналізу для зразків, відібраних на відстані 1 і 25 м від краю кратера, демонструють як характерну поведінку для ґрунтів, так і візуалізують інші ознаки, які ми вважаємо пов'язаними із забрудненням внаслідок вибухів. Характерними ознаками є те, що на кривих охолодження сигнал сильніший, ніж на кривих нагрівання, через утворення нової сильномагнітної фази. На кривих нагріву спостерігаємо невелике підвищення магнітної сприйнятливості нижче 280 °С, що можна інтерпретувати як поступове розблокування дрібнозернистих однодомених (SD) частинок, які є SD за кімнатної температури, але переходять у суперпарамагнітний стан за підвищених температур. Подальше підвищення магнітної сприйнятливості спостерігаємо в діапазоні 280–400 °С, що обумовлено утворенням незначної кількості нового ферімагнітного матеріалу. Подальше підвищення між 400 і 500 °С з піком близько 520 °С можна пов'язати з ефектом Гопкінсона (повним або частковим) для SD магнетиту, що нижчий за точку Кюрі магнетиту ($T_c = 580$ °С)

(Dunlop, & Özdemir, 1997). Під час подальшого нагрівання магнітна сприйнятливість різко спадає до кінцевої температури 590–605 °С. Крива охолодження кожного зразка набагато вища, ніж його крива нагрівання, величини магнітної сприйнятливості значно збільшуються нижче 580 °С, що ми інтерпретуємо як утворення магнетиту у процесі нагрівання.

Водночас на кривих прослідковуємо незвичний для ґрунтів "хвіст" після 600 °С аж до 680 °С, що вказує на вміст металевого заліза. Віддаленіші від місця кратера зразки ґрунту не показують цей хвіст. Зразок із фракцією 1–100 мкм демонструє температуру Кюрі (T_c) 650 °С, характерну для маггеміту (Dunlop, & Özdemir, 1997). Крива охолодження також показує зазначену T_c , що свідчить про термічну стабільність відповідного мінералу. Найімовірніше ця магнітна фаза є термостабільним однодоменим і псевдооднодоменим маггемітом (SD-PSD) (Gehring et al., 2009). Отже, у зразках міститься як фракція заліза, так і маггеміт.

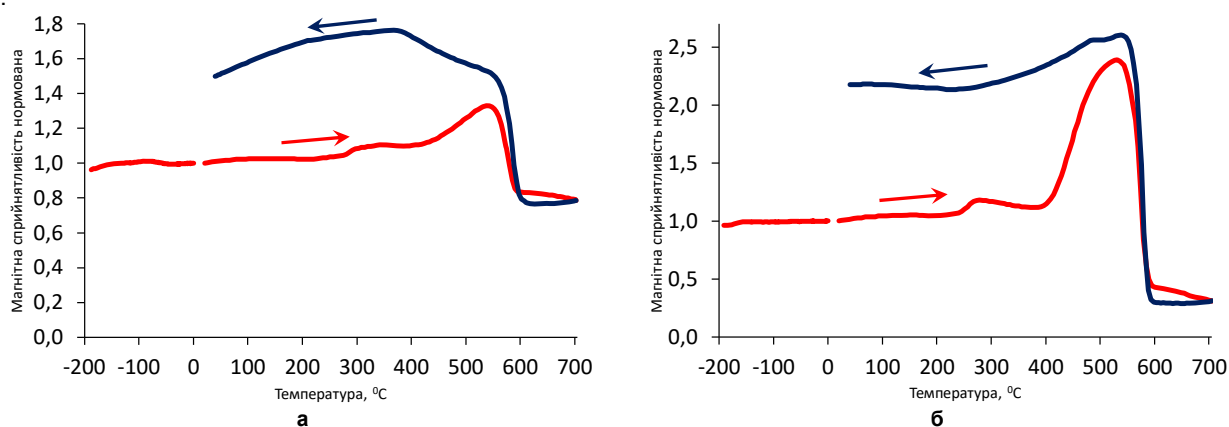


Рис. 4. Результати термомагнітного аналізу магнітної сприйнятливості для зразків полігону Старі Петрівці: а) 1 м від кратеру вибуху, б) 25 м від кратеру вибуху

Результати мікроскопічних досліджень зразків ґрунтів із місця вибуху для прикладу проілюструємо для полігону Старі Петрівці (рис. 5). Виявлено велику кількість сферул і фрагментів розміром від 1,5 до 100 мкм (рис. 5). Частина сфер має гладку поверхню. Частішими є порожнисті сферули з помітними дірками, що залишилися після дегазації (Magiera et al., 2011). Вони мають енцефалоїдну, табличну або скелетну поверхню.

Вміст важких металів у магнітній фракції ґрунтів з об'єктів військового ураження залежить від складу сплавів зброї. У складі магнітних сфер й уламків

переважають зразки, насичені залізовмісними гладкими кульками, що містять невелику кількість Ті, та кулистими фрагментами, які містять Zn, Cr та Al.

У нашому випадку утворення сферул й уламків також пов'язане з високотемпературними процесами, що відбуваються під час вибуху. Проте наявність агломератів сферул більшого розміру з вплавленими в них меншими сферулами вказує на те, що, крім термічного впливу, важливу роль у формуванні морфології частинок відігравало також значне динамічне навантаження.

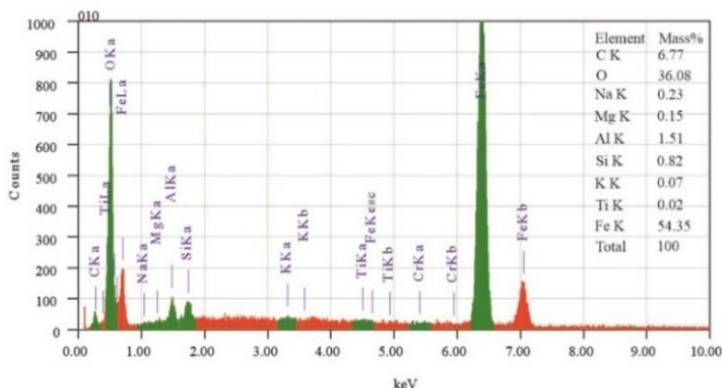
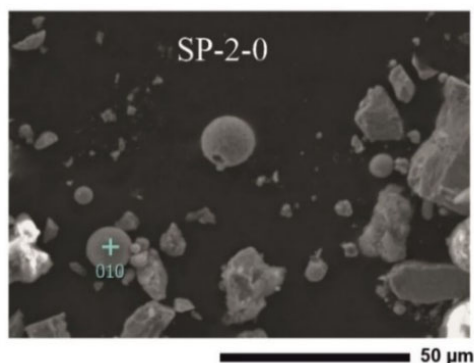


Рис. 5. Результати сканування електронним мікроскопом (SEM) і результати мікроаналізу частинок ґрунтів дослідної ділянки Старі Петрівці

Дискусія і висновки

Стабільні однодоменні (SSD) частинки були виявлені в ґрунтах для всіх досліджуваних ділянок, тоді як ґрунти у Старих Петрівцях містять як грубозернисті, так і дрібозернисті зерна. Високий вміст суперпарамагнітних (SP) частинок підтверджує постійні ґрунтовірні процеси, зокрема й у верхньому шарі ґрунту (верхній гумусний горизонт А). Отже, у ґрунтах Старих Петрівців проявляються як техногенні, так і ґрунтові процеси. Магнітно-мінералогічні дані свідчать про те, що досліджувана ділянка Старі Петрівці демонструє магнітний сигнал, який можна інтерпретувати як техногенний.

У нашому випадку техногенний сигнал є еквівалентом спричинених війною аномалій магнітних параметрів та рівня забруднення ґрунту. З іншого боку, магнетизм ґрунтів дослідних ділянок Демидів й Озера зазвичай пов'язаний із ґрунтовими природними процесами, характерними для Полісся України. Іноді ідентифікуємо метали, які є великими (назвімо їх макрорівнем військового техногенного забруднення) частинками, що пов'язані з матеріалами вибуху. Водночас перерозподіл генетичних горизонтів ґрунту внаслідок бомбардувань і вибухів ракет є важливою інформацією і відображається у варіаціях магнітних величин.

Під час вибуху різних типів боєприпасів утворюються уламки неправильної форми через потужне механічне навантаження, а додаткова наявність високотемпературної компоненти процесу призводить до утворення металевих сферул. Це складний фізико-хімічний процес, що виникає внаслідок взаємодії високотемпературних газів, пилу та розплавленого металу. Під впливом високих температур металеві складові боєприпасів розплавляються, переходячи в рідку фазу. Подальша взаємодія рідкої фази з навколишніми матеріалами, різке зниження тиску та швидка конденсація газоподібних речовин сприяють швидкому охолодженню металевого розчину в середовищі з мінімальною кількістю кисню, що забезпечує формування сферичних або кульоподібних структур різної морфології та складу (Fialová et al., 2006; Kutcho, & Kim, 2006).

Внесок авторів: Олександр Меньшов – ідея, аналіз та інтерпретація даних, написання статті; Ксенія Бондар – ідея, аналіз та інтерпретація даних, магнітні вимірювання; Володимир Бахмутов – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Дмитро Главацький – методологія, валідація даних, вимірювання; Євген Поляченко – формальний аналіз, методологія.

Подяка та джерела фінансування: Дослідження виконувалися за проектом PAN.BFB.S.BWZ.394.022.2023, який реалізується в межах програми підтримки українських дослідників колективів Польської академії наук, що виконується у співпраці з Національною академією наук США. Ми вдячні за надану можливість користуватися апаратурою Інституту геофізики Польської академії наук (KLY5, MMPM10), що була закуплена завдяки проекту EPOS-PL (№ POIR.04.02.00-14-A003/16) у співфінансуванні з Європейським Союзом із фондів ERDF.

Список використаних джерел

- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Barbosa, J. Z., Poggere, G. C., Teixeira, W. W. R., Motta, A. C. V., Prior, S. A., & Curi, N. (2020). Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility. *Environmental monitoring and assessment*, 192(1), 46.
- Bondar, K., Bakhtmutov, V., Menshov, O., Poliachenko, I., & Hlavatskyi, D. (2023). Detecting War-Related Pollution of Soils Using Magnetic and Geochemical Methods. First Results from Recaptured Outskirts of Kyiv. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520209>
- Bučko, M. S., Magiera, T., Johanson, B., Petrovský, E., & Pesonen, L. J. (2011). Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses. *Environmental Pollution*, 159(5), 1266–1276.
- Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (1997). *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>

- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Elsevier.
- Eyre, J. K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess – the role of $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265–271.
- Fialová, H., Maier, G., Petrovský, E., Kapička, A., Boyko, T., Scholger, R., & MAGPROX Team. (2006). Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *Journal of Applied Geophysics*, 59(4), 273–283.
- Gehring, A. U., Fischer, H., Louvel, M., Kunze, K., & Weidler, P. G. (2009). High temperature stability of natural maghemite: a magnetic and spectroscopic study. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1361–1371.
- Górka-Kostrubiec, B., Świątek, R., Szumiata, T., Dytłow, S., & Trojanowska, M. (2023). Integration of chemical fractionation, Mössbauer spectrometry, and magnetic methods for identification of Fe phases bonding heavy metals in street dust. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 875–891.
- Guda, A. M. et al. (2020). Suitability of magnetic proxies to reflect complex anthropogenic spatial and historical soil heavy metal pollution in the southeast Nile delta. *Catena*, 191, 104552. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104552>
- Hu, X. F., Li, M., He, Z. C., Cui, L., Liu, R., Wang, X. D., & Wang, Z. H. (2022). Magnetic responses to heavy metal pollution of the industrial soils in Shanghai: Implying the influences of anthropogenic magnetic dustfall on urban environment. *Journal of Applied Geophysics*, 197, 104544.
- Jackson, M. J., & Moskowitz, B. (2021). On the distribution of Verwey transition temperatures in natural magnetites. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1314–1325.
- Jordanova, N., Jordanova, D., Tcherkezova, E., Georgieva, B., & Ishlyanski, D. (2021). Advanced mineral magnetic and geochemical investigations of road dusts for assessment of pollution in urban areas near the largest copper smelter in SE Europe. *Science of the Total Environment*, 792, 148402.
- Kelepertzis, E., Argyraki, A., Botsou, F., Aidona, E., Szabó, Á., & Szabó, C. (2019). Tracking the occurrence of anthropogenic magnetic particles and potentially toxic elements (PTEs) in house dust using magnetic and geochemical analyses. *Environmental pollution*, 245, 909–920.
- Kutcho, B. G., & Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM-EDS. *Fuel*, 85(17–18), 2537–2544.
- Linford, N., Linford, P., & Platzman, E. (2005). Dating environmental change using magnetic bacteria in archaeological soils from the upper Thames Valley, UK. *Journal of Archaeological Science*, 32(7), 1037–1043.
- Magiera, T., Jabłońska, M., Strzyszczyński, Z., & Rachwał, M. (2011). Morphological and mineralogical forms of technogenic magnetic particles in industrial dusts. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4281–4290.
- Maitly, R., Venkateshwarlu, M., Mondal, S., Kapawar, M. R., Gain, D., & Paul, P. (2021). Magnetic and microscopic characterization of anthropogenically produced magnetic particles: a proxy for environmental pollution. *International journal of environmental science and technology*, 18, 1793–1808.
- Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M., & Fox, D. L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28–48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>
- Menshov, O., Bakhtmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. *85th EAGE Annual Conference & Exhibition (including the Workshop Programme)*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202410637>
- 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.
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., & Roeckner, E. (1993). The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 177–193. <https://doi.org/10.3354/cr003177>
- Oldfield, F. (1994). Toward the discrimination of fine grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 99, 9045–9050. <https://doi.org/10.1029/93JB03137>
- Oudeika, M. S., Altinoglu, F. F., Akbay, F., & Aydin, A. (2020). The use of magnetic susceptibility and chemical analysis data for characterizing heavy metal contamination of topsoil in Denizli city, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 183, 104208.
- Özdemir, Ö., & Dunlop, D. J. (2010). Hallmarks of maghemitization in low-temperature remanence cycling of partially oxidized magnetite nanoparticles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2).
- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F. R., & Calvo-Brenes, G. (2024). Magnetic and Chemical Testing in Plants, Road Dust and Soil, as Indicators of Atmospheric Pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(9), 601.
- Szuskiewicz, M., Łukasik, A., Magiera, T., & Mendakiewicz, M. (2016). Combination of geo-pedo- and technogenic magnetic and geochemical signals in soil profiles—diversification and its interpretation: a new approach. *Environmental pollution*, 214, 464–477.
- Rachwał, M., Kardel, K., Magiera, T., & Bens, O. (2017). Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition. *Geoderma*, 295, 10–21.
- WRB, I. W. G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Report*, 106.

References

- Barbosa, J. Z., Poggere, G. C., Teixeira, W. W. R., Motta, A. C. V., Prior, S. A., & Curi, N. (2020). Assessing soil contamination in automobile scrap yards by portable X-ray fluorescence spectrometry and magnetic susceptibility. *Environmental monitoring and assessment*, 192(1), 46.

- Bondar, K., Bakhmutov, V., Menshov, O., Poliachenko, I., & Hlavatskyi, D. (2023). Detecting War-Related Pollution of Soils Using Magnetic and Geochemical Methods. First Results from Recaptured Outskirts of Kyiv. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520209>
- Bučko, M. S., Magiera, T., Johanson, B., Petrovský, E., & Pesonen, L. J. (2011). Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses. *Environmental Pollution*, 159(5), 1266–1276.
- Dunlop, D. J., & Özdemir, Ö. (1997). *Rock magnetism: fundamentals and frontiers*. Cambridge university press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511612794>
- Evans, M., & Heller, F. (2003). *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics*. Elsevier.
- Eyre, J. K., & Shaw, J. (1994). Magnetic enhancement of Chinese loess – the role of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$? *Geophysical Journal International*, 117(1), 265–271.
- Fialová, H., Maier, G., Petrovský, E., Kapička, A., Boyko, T., Scholger, R., & MAGPROX Team. (2006). Magnetic properties of soils from sites with different geological and environmental settings. *Journal of Applied Geophysics*, 59(4), 273–283.
- Gehring, A. U., Fischer, H., Louvel, M., Kunze, K., & Weidler, P. G. (2009). High temperature stability of natural maghemite: a magnetic and spectroscopic study. *Geophysical Journal International*, 179(3), 1361–1371.
- Górka-Kostrubiec, B., Świetlik, R., Szumiata, T., Dytłow, S., & Trojanowska, M. (2023). Integration of chemical fractionation, Mössbauer spectrometry, and magnetic methods for identification of Fe phases bonding heavy metals in street dust. *Journal of Environmental Sciences*, 124, 875–891.
- Guda, A. M. et al. (2020). Suitability of magnetic proxies to reflect complex anthropogenic spatial and historical soil heavy metal pollution in the southeast Nile delta. *Catena*, 191, 104552. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104552>
- Hu, X. F., Li, M., He, Z. C., Cui, L., Liu, R., Wang, X. D., & Wang, Z. H. (2022). Magnetic responses to heavy metal pollution of the industrial soils in Shanghai: Implying the influences of anthropogenic magnetic dustfall on urban environment. *Journal of Applied Geophysics*, 197, 104544.
- Jackson, M. J., & Moskowitz, B. (2021). On the distribution of Verwey transition temperatures in natural magnetites. *Geophysical Journal International*, 224(2), 1314–1325.
- Jordanova, N., Jordanova, D., Tcherkezova, E., Georgieva, B., & Ishlyamski, D. (2021). Advanced mineral magnetic and geochemical investigations of road dusts for assessment of pollution in urban areas near the largest copper smelter in SE Europe. *Science of the Total Environment*, 792, 148402.
- Kelepertzis, E., Argyraki, A., Botsou, F., Aidona, E., Szabó, Á., & Szabó, C. (2019). Tracking the occurrence of anthropogenic magnetic particles and potentially toxic elements (PTEs) in house dust using magnetic and geochemical analyses. *Environmental pollution*, 245, 909–920.
- Kutchko, B. G., & Kim, A. G. (2006). Fly ash characterization by SEM–EDS. *Fuel*, 85(17–18), 2537–2544.
- Linford, N., Linford, P., & Platzman, E. (2005). Dating environmental change using magnetic bacteria in archaeological soils from the upper Thames Valley, UK. *Journal of Archaeological Science*, 32(7), 1037–1043.
- Magiera, T., Jabłońska, M., Strzyszc, Z., & Rachwał, M. (2011). Morphological and mineralogical forms of technogenic magnetic particles in industrial dusts. *Atmospheric Environment*, 45(25), 4281–4290.
- Maity, R., Venkateshwarlu, M., Mondal, S., Kapawar, M. R., Gain, D., & Paul, P. (2021). Magnetic and microscopic characterization of anthropogenically produced magnetic particles: a proxy for environmental pollution. *International journal of environmental science and technology*, 18, 1793–1808.
- Maxbauer, D. P., Feinberg, J. M., & Fox, D. L. (2016). Magnetic mineral assemblages in soils and paleosols as the basis for paleoprecipitation proxies: A review of magnetic methods and challenges. *Earth-Science Reviews*, 155, 28–48. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.014>
- Menshov, O., Bakhmutov, V., Hlavatskyi, D., Poliachenko, I., & Bondar, K. (2024). Magnetic Imprint in the Soils as a Consequence of War Impact in Ukraine. *85th EAGE Annual Conference & Exhibition* (including the Workshop Programme), 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202410637>
- 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.
- Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. *Visnuk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80(1), 40–45 [in Ukrainian].
- Lohmann, U., Sausen, R., Bengtsson, L., Cubasch, U., Perlwitz, J., & Roeckner, E. (1993). The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Climate Research*, 177–193. <https://doi.org/10.3354/cr003177>
- Oldfield, F. (1994). Toward the discrimination of fine grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *Journal of Geophysical Research*, 99, 9045–9050. <https://doi.org/10.1029/93JB03137>
- Oudeika, M. S., Altinoglu, F. F., Akbay, F., & Aydin, A. (2020). The use of magnetic susceptibility and chemical analysis data for characterizing heavy metal contamination of topsoil in Denizli city, Turkey. *Journal of Applied Geophysics*, 183, 104208.
- Özdemir, Ö., & Dunlop, D. J. (2010). Hallmarks of maghemitization in low-temperature remanence cycling of partially oxidized magnetite nanoparticles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B2).
- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F. R., & Calvo-Brenes, G. (2024). Magnetic and Chemical Testing in Plants, Road Dust and Soil, as Indicators of Atmospheric Pollution. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(9), 601.
- Szuskiewicz, M., Łukasik, A., Magiera, T., & Mendakiewicz, M. (2016). Combination of geo-pedo-and technogenic magnetic and geochemical signals in soil profiles–diversification and its interpretation: a new approach. *Environmental pollution*, 214, 464–477.
- Rachwał, M., Kardel, K., Magiera, T., & Bens, O. (2017). Application of magnetic susceptibility in assessment of heavy metal contamination of Saxonian soil (Germany) caused by industrial dust deposition. *Geoderma*, 295, 10–21.
- WRB, I. W. G. (2014). World reference base for soil resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Report*, 106.

Отримано редакцією журналу / Received: 18.05.24
 Прорецензовано / Revised: 27.07.24
 Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Oleksandr MENSHOV¹, DSc (Geol.), Senior Researcher
 ORCID ID: 0000-0001-7280-8453
 e-mail: menshov@knu.ua

Kseniia BONDAR^{1,2}, DSc (Geol.)
 ORCID ID: 0000-0002-4946-7707
 e-mail: kbondar@igf.edu.pl

Volodymyr BAKHMUTOV³, DSc (Geol.), Prof., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
 ORCID ID: 0000-0003-3804-9953
 e-mail: bakhmutovvg@gmail.com

Dmytro HLA VATSKYI³, PhD (Geol.), Senior Researcher
 ORCID ID: 0000-0002-9901-7827
 e-mail: hlvatskyi@gmail.com

Ievgen POLIACHENKO³, PhD (Geol.), Senior Researcher
 ORCID ID: 0000-0002-3316-4605
 e-mail: poliachenkoib@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

³Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MAGNETIC MINERALOGICAL PROPERTIES OF KYIV REGION SOILS, AFFECTED BY WAR

Background. One of the dangerous effects on the environment caused by the military actions in Ukraine is the destruction of the soil. This includes its pollution, redistribution of genetic horizons, compaction, change of physical and chemical agronomic indicators, etc. Accumulated experience shows that most of these processes are reflected in the magnetic properties of soils.

Methods. The applied magnetic method includes a full range of field and laboratory studies. More detailed magnetic mineralogical methods of measurements are described in.

Results. On the basis of the diagram developed for the ratios of anhysteretic magnetic susceptibility to low-frequency magnetic susceptibility (χ_{ARM}/χ_{lf}) and anhysteretic magnetic susceptibility to the frequency dependence of magnetic susceptibility (χ_{ARM}/χ_{fd}), fine-grained magnetic

particles of lithogenic and bacterial origin were detected in the soils of experimental areas of Kyiv region. For Stari Petrivtsi, only one group of samples was mainly identified. In Demydiv, we found two groups: a larger one, marked in green, and a smaller one, marked in red. Finally, two equivalent groups were identified in the Ozero study site. According to the results of the thermomagnetic analysis of magnetic susceptibility, an unusual "tail" for soils was identified after 600 °C, which indicates the content of metallic iron. The content of heavy metals in the magnetic extraction of soils from objects of military defeat depends on the composition of the alloys of the weapons striking a specific place.

C o n c l u s i o n s . During the explosion of various types of ammunition, fragments of irregular shape are formed due to strong mechanical impact, and additional heating in the process leads to the formation of iron spherules. This complex physico-chemical process occurs as a result of the interaction of high-temperature gases, dust and molten metal. These objects are successfully identified by quick and cheap magnetic methods.

K e y w o r d s : magnetic susceptibility, soil, heavy metals, magnetization, war.

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

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

UDC 550.834.05:551.24

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.02>

Andrii TYSHCHENKO^{1,2}, PhD (Geol.)
ORCID ID: 0000-0001-9640-2300
e-mail: Tyshchenko@naftogaz.com

Andrii VYZHVA³, PhD (Phys. & Math.)
ORCID ID: 0009-0003-6699-5848
e-mail: andrii.vyzhva@ugv.com.ua

Leonid MELNYK¹, Head of the E&P Section
e-mail: MelnykLP@naftogaz.com

Jonas Fagerli TEGNANDER⁴, Staff Geophysicist
e-mail: Jonas.Tegnander@pgs.com

Lars-Erik KITTELL⁴, Imaging Supervisor
e-mail: lars-erik.kittell@pgs.com

Kristian Svarva HELGEBOSTAD⁴, Staff Geophysicist
e-mail: Kristian.Helgebostad@pgs.com

¹NJSC Naftogaz of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³UkrNDIgaz Res. Inst., Kyiv, Ukraine

⁴PGS Exploration (UK) Ltd, Oslo, Norway

STATE-OF-THE-ART 3D ACQUISITION AND IMAGING IN ULTRA-SHALLOW WATER IN THE NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA

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

Background. The paper discusses the acquisition and imaging (PSDM+FWI) of 3D seismic data in the ultra-shallow waters of the Black Sea's northwestern shelf, focusing on the Dolfin Inner shelf license areas. Despite depths ranging from 14m to 40m, an efficient acquisition setup has been chosen to navigate seafloor obstacles.

Methods. GeoStreamer data has allowed more advanced imaging options. Access to separated wavefield components has permitted us to include advanced processing technologies. The data underwent advanced processing, including 3D wavefield separation, deghosting, demultiple, and machine learning-guided denoising.

Results. Results demonstrate the final migration velocity model's (with FWI) ability to capture high and low velocity contrasts critical for depth imaging. Separated wavefield imaging (SWIM) enhances imaging of the seafloor providing a very good match with bathymetry data. SWIM also allows acquiring high-resolution images of the shallow water area, which opens up the possibility of using this data for wind farm siting and hydrogen exploration.

Conclusions. Comparing 2D and 3D seismic data emphasizes the latter's superior quality, crucial for evaluating the Dolfin Inner shelf area's hydrocarbon potential. Next study will focus on the exploration in the Outer Shelf and adjacent deepwater domains, highlighting the Black Sea's Ukrainian waters as a promising frontier for oil and gas exploration. The acquired 3D seismic data plays a pivotal role in advancing this exploration, contributing valuable insights in a cost-effective manner.

Keywords: acquisition, depth imaging, ultra-shallow water, FWI, SWIM, PSDM, Black Sea, Machine learning.

Background

The northwestern shelf of the Black Sea mega-basin is a gas producer no. 1 within the Southern petroleum province of Ukraine and still offers great exploration opportunities in largely unexplored acreage. Many large structural and potential stratigraphic hydrocarbon trapping features were identified by a regional 2D survey. The area depicts a promising frontier for 3D seismic exploration, holding the potential to significantly contribute to the country's future energy security. In 2021, Naftogaz of Ukraine contracted PGS to acquire 5000 km² of high-quality multi-sensor seismic data (Fig. 1) in the inner shelf area of the Dolfin license.

Despite the area's ultra-shallow water depth which varies from 14 m to 40 m, an efficient acquisition set-up with 8 km long streamers towed 112.5 m apart utilizing triple sources had been selected. In addition to the already shallow water depth, a high-resolution bathymetry study conducted prior to the streamer operations uncovered various obstacles on the seafloor. To mitigate the risk of hitting the ground or one of those obstacles, the streamers had to be towed at a depth between 8 m and 10 m which is significantly shallower than the usual 25 m.

As the first depth imaging project in the area, the data was processed using a state-of-the-art broadband flow, comprising of techniques such as 3D wavefield separation,

3D deghosting, 3D demultiple, 4D regularization, velocity model building incorporating full waveform inversion and reflection tomography followed by VTI Kirchhoff depth migration and post-processing. Separated wavefield imaging (Whitmore et al., 2010) provided an accurate image the water bottom while a machine learning guided denoise (Klochikhina et al., 2020) was applied to the migrated image to further enhance the final product.

The results show how an efficient 3D acquisition and state-of-the-art imaging can provide cost-effective and high-quality data to accelerate exploration in a frontier basin.

Geological Setting. The geology of the NW Black Sea was revealed thanks to more than 100 deep wells and a rather dense 2D seismic lines grid (Stovba et al., 2023). The depth of the wells varies from 2000 to 4600 m (Tauvers et al., 2022). The sediments covering the NW Black Sea are represented by terrigenous and carbonate formations of Triassic to Neogene sequences with thickness up to 9 km in total. The productive horizons are located in Upper Cretaceous and Tertiary reservoir rocks. A major feature is the Karkinit Trough, an extensive Early Cretaceous rift basin filled with Cretaceous to Quaternary post rift sediments. The newly acquired 3D dataset plays an important role to understand the integral geological image of the region and to identify new hydrocarbon prospects.

© Tyshchenko Andrii, Vyzhva Andrii, Melnyk Leonid, Tegnander Jonas Fagerli, Kittell Lars-Erik, Helgebostad Kristian Svarva, 2024

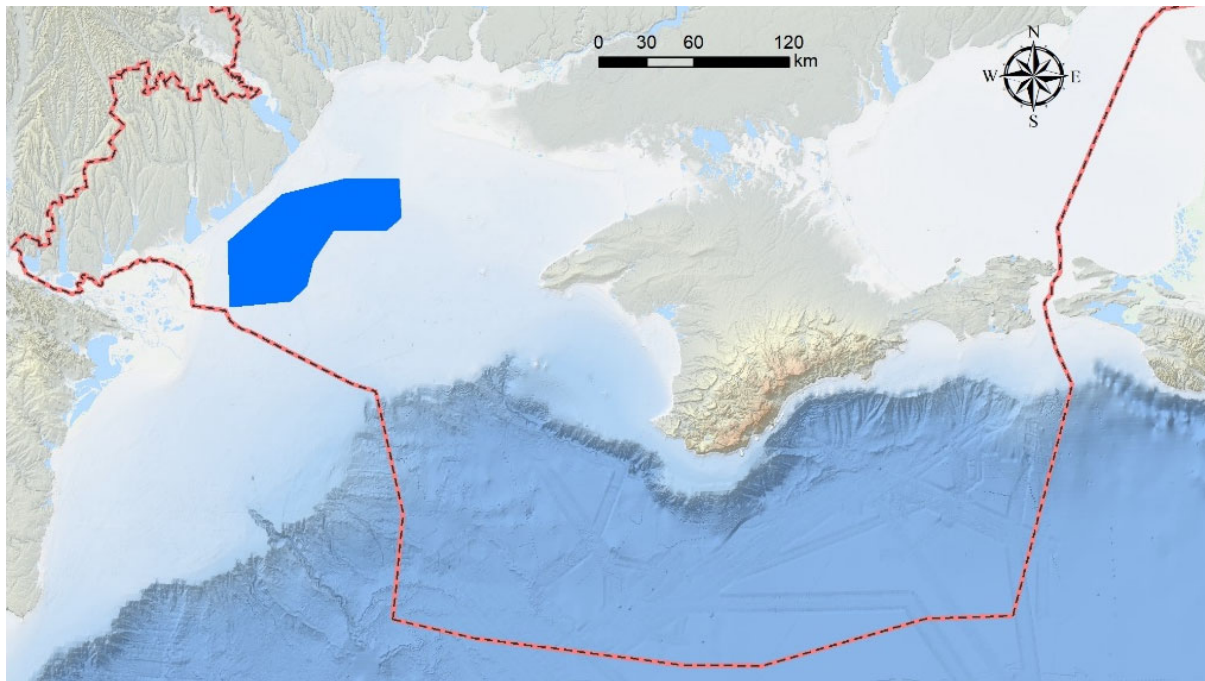


Fig. 1. Location of the survey area. The Inner shelf Dolphin license sits in the northwestern corner of the Black Sea, offshore Ukraine

The area of interest covered with newly acquired 3D seismic data is represented by two thrust slabs (pre-Cenomanian inverted normal faults with strike-slip component) located north to the front of the Golitsyn-Sassyk main thrust developed during the main Maikop inversion and further series of the Styrian tectonic phases. Two types of the basement occur there – first one with the AR-PR₂ true basement of the East European Craton with Lower-Middle PZ acoustically transparent metasedimentary cover and the Vilkovo composite mini-basin surrounded by horsts made by the Cadomian basement. The AOI is well correlated with the Dobrogea foredeep with producing oil fields onshore.

Methods

Multisensor GeoStreamer data (Carlson et al., 2007; Lu et al., 2015) has allowed more advanced imaging options. The multisensor data, with full-frequency coverage, provides clearer reservoir details. Access to separated wavefield components has permitted us to include advanced processing technologies, such as Separated Wavefield Imaging (SWIM), Full Waveform Inversion (FWI).

GeoStreamer mitigates the effect of the receiver ghost reflections from the highly reflective sea surface. Higher-signal-to-noise ratio (SNR) than hydrophone-only streamers for all survey conditions are achieved by towing the streamers at a safe operational depth in ultra-shallow waters, without compromising the bandwidth. Another benefit is the longer operating weather windows due to low-noise deep towing. Collocated pressure and particle velocity sensor provide direct complementary measurements and therefore yield separated wavefields which are free of artifacts associated with local variations in sea-surface height or receiver depth. Shallow seismic images have substantially fewer artifacts, and shallow geohazards can be detected with far greater confidence and resolution with SWIM. High-fidelity AVO / AVA pre-stack gathers are optimal for quantitative interpretation and subsurface characterization.

Collocated groups of hydrophone pressure sensors and vertical velocity sensors record the continuous interference between the wavefield scattered upwards from the geology

in the subsurface and the downgoing wavefield that carries the imprint of the reflecting sea surface, which is different for every shot. This downgoing wavefield is called the receiver ghost wavefield (Fig. 2).

Wavefield separation is a critical step in broadband seismic imaging workflows applied to multisensor streamer and node seismic data. The pressure and velocity sensors record each upgoing seismic event with equal polarity, while the time-delayed downgoing seismic event is measured with opposite polarity (Fig. 3).

All events associated with sea-surface ghost reflections can be isolated and removed for traditional high-resolution imaging and subsurface characterization. Alternatively, separated data can be used for SWIM imaging to improve the resolution of the shallow subsurface where traditional imaging solutions fail, in particular in shallow waters due to limitation in near angle illumination.

Operationally, multisensor streamers are less noisy as they permit deep towing with a shallower front end to reduce tension and enable very wide streamer spreads. The upgoing wavefield has a rich low-frequency signal, courtesy of the deep towing, and also a rich high-frequency signal; Primary reflection signal is not affected by sea-surface variations.

The acquired data was processed using a state-of-the-art depth imaging flow (Fig. 4). 3D wavefield separation (Carlson et al., 2007), which outputs the upgoing pressure wavefield, was followed by 3D deghosting to compensate for the amplitude and phase effects of the source ghost, therefore enhancing the bandwidth of the data. 3D shot-to-shot designator was designed to convert the far-field signatures into a zero-phase wavelet, honouring the varying conditions in which each shot was fired and correcting for the directivity of the source.

The ultra-shallow water depths found in the Inner Dolphin area requires modern demultiple techniques to successfully enhance the signal-to-noise ratio of the data. The demultiple sequence comprised of adaptive subtraction of a 3D wavefield extrapolation multiple model to target free-surface short-period multiples followed by adaptive subtraction of a

mutated convolutional 3D SRME model to target long-period multiples. The sequence was complemented with parabolic

Radon demultiple to further clean the data discriminating primaries and multiples based on velocity.

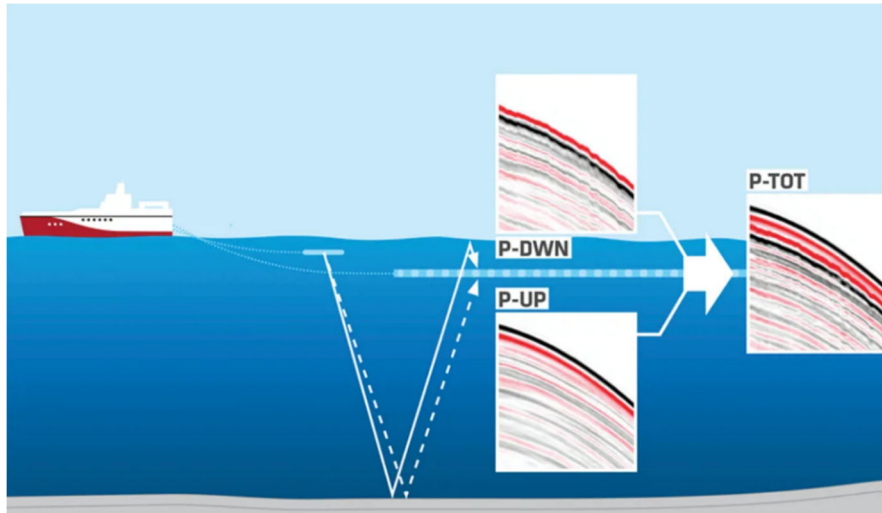


Fig. 2. Schematic illustration of the continuous interference between the up-going and time-delayed down-going wavefields recorded by hydrophone-only streamers. Wavefield separation of multisensor streamer (GeoStreamer) data accurately recovers the P-UP and P-DWN wavefields

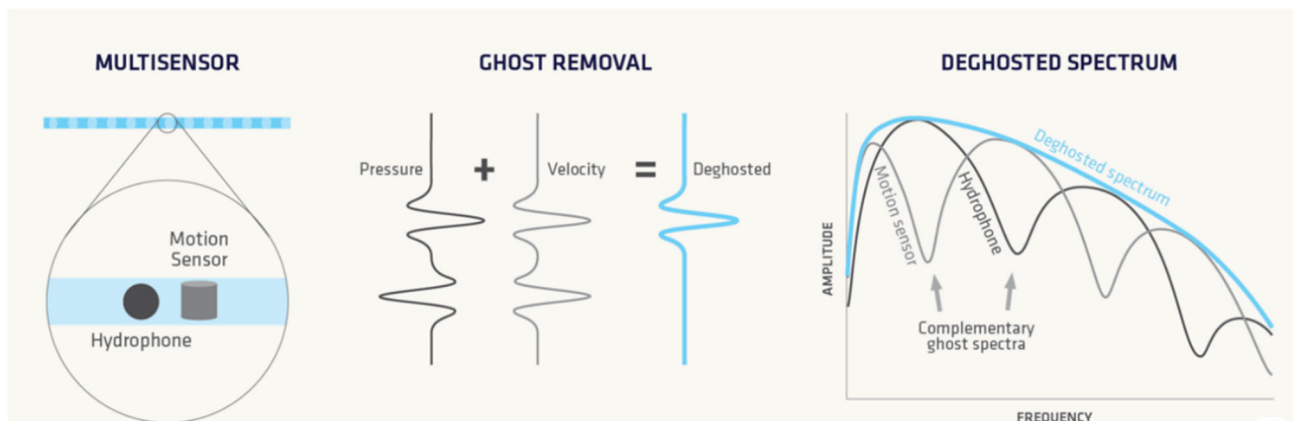


Fig. 3. Multisensor GeoStreamer has both pressure and particle velocity sensors collocated in the streamer body. Two signals are recorded and using a processing step called wavefield separation two complementary data volumes are created: an up-going pressure wavefield and a down-going pressure wavefield. These wavefields are used in complementary ways for various subsurface imaging and characterization pursuits

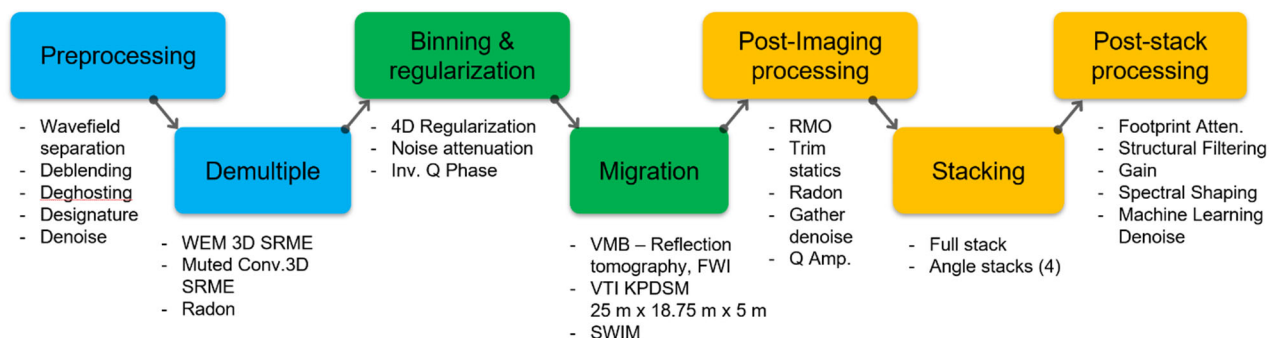


Fig. 4. High-level state-of-the-art broadband depth imaging flow

The velocity model building flow consisted of building an initial velocity model from a smooth manually picked time velocity field which was updated by a 12 Hz Full Waveform Inversion (FWI) interleaved with several reflection tomography passes. FWI provided complex velocity updates in the overburden while tomography handled the target

section and below. FWI (Yang et al., 2020, 2021) delivers high-resolution models of subsurface properties by iteratively reducing the misfit between recorded and synthetic shot gathers.

The FWI solution uses both diving waves (wavefronts continuously refracted upwards through the earth) and

reflected waves to update the velocity model. The use of reflection information relaxes the traditional dependence of FWI upon very long offset acquisition for deeper velocity updates. Thanks to advanced inversion kernels, the background velocity model can be separated from the reflectivity information, thereby avoiding crosstalk artifacts in the output velocity model.

The final velocity model was used in Kirchhoff pre-stack depth migration (KPSDM) and Separated Wavefield

Imaging (SWIM) to obtain a high-quality image of the subsurface with a correctly positioned water bottom that tied well to the high-resolution bathymetry. After post-processing of migrated gathers and stacks, machine learning imaging denoise (Klochikhina et al., 2020) was utilized to further enhance the final product, which targets migration swings and general residual random noise. The process improves event continuity and signal-to-noise ratio which leads to a cleaner and better interpretable product.

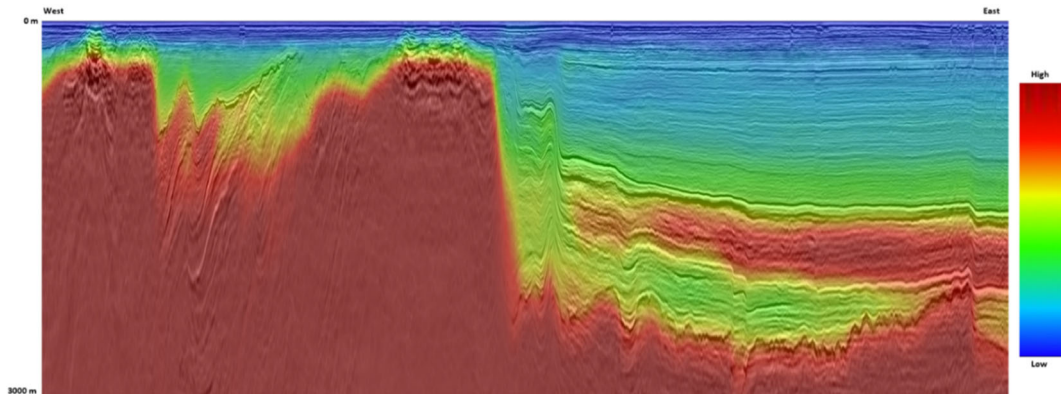


Fig. 5. Migration velocity model overlaid onto final stack. Large velocity contrasts are present over the seismic section, from the uplifted basement of high velocity in the west to the low-velocity shallow channel systems and gas pockets in the east. The velocity model is overall very conformable with the geology

Results

The geology consists of both low and high velocity contrasts, from channel systems and gas pockets, but also uplifted basement close to the sea floor. An accurate velocity field capturing these velocity contrasts is essential for successful depth imaging. Figure 5 shows the final migration velocity model overlaid onto a stack. To the west, velocities up to 3000 m/s can be observed as shallow as 200 m below the sea floor. To the east, on the contrary, low-velocity features can be observed, some very locally, most likely from shallow gas and channel systems. In overall, the final velocity model is capturing the velocity variations of the subsurface, critical for a good final image.

In ultra-shallow waters, near surface imaging with primaries can suffer from the lack of near-offsets when using

efficient acquisition configurations. This is evident from the final stack in Fig. 6a, where the water bottom cannot be successfully interpreted and shows a significant timing difference with the overlaid water bottom from the high-resolution bathymetry study. Imaging with multiples, achievable with separated wavefield imaging (SWIM) can overcome the challenges from lack of near-offsets as each receiver is used as a virtual source, reducing the effective near-offset gap to the distance between each receiver. Fig. 6b shows the final stack after merging images from primaries and multiples. The overlaid water bottom from the high-resolution bathymetry study shows how the SWIM image accurately represents the water bottom, also capturing small scale details that can be observed from the bathymetry data.

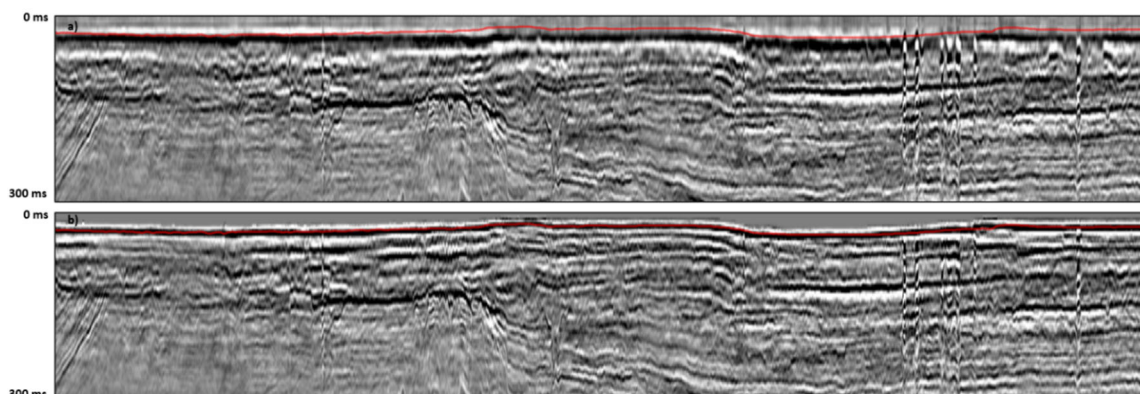


Fig. 6. Final KPSDM stack (a) and final KPSDM stack with SWIM imaging in shallow section (b). The SWIM imaging helps to improve the shallow imaging, especially evident from the good match with the bathymetry data (red line overlaid). An increase in acoustic impedance is shown as a black event (peak)

Several seismic 2D lines have been acquired in the past over the Dolfin area. Although 2D seismic serves as a good foundation to develop understanding of the geology, the limitations are well known. The final 3D data is compared to a 2D line in Fig. 7. Although there are significant processing

differences between the two data sets, the major geological boundaries can be tracked in both. The 3D data set shows overall superior data quality, especially evident in the deeper section, where there are large differences in imaging and multiple attenuation.

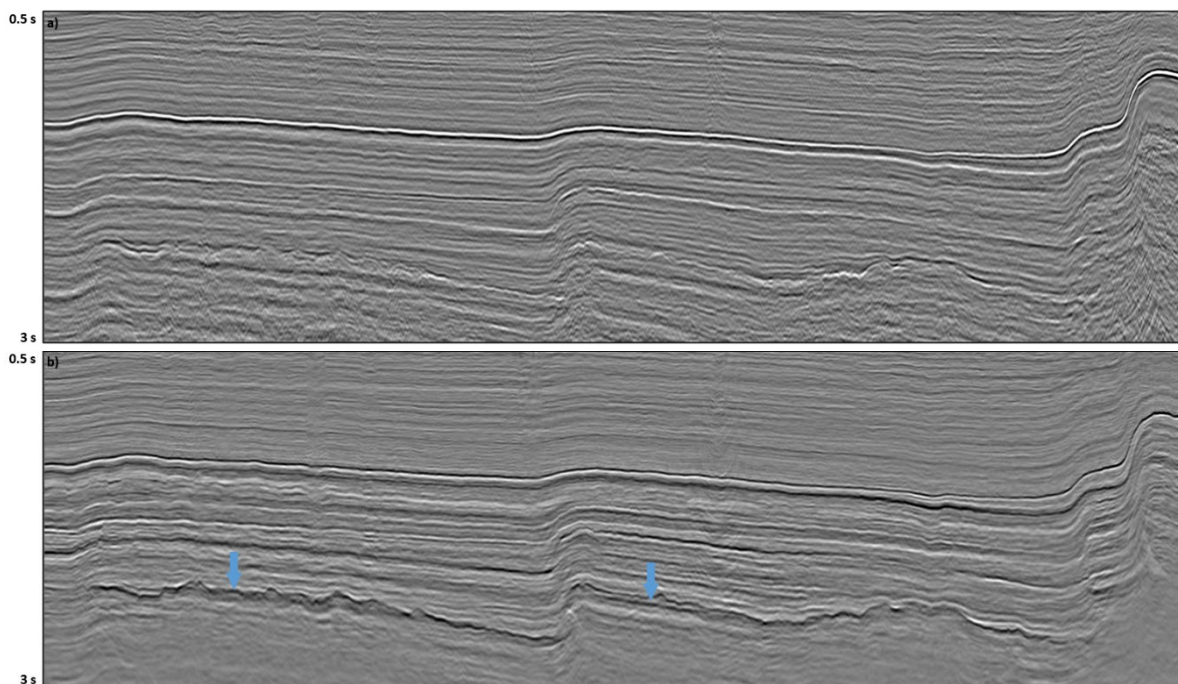


Fig. 7. Comparison between 2D (a) and 3D seismic data (b) of the target section over the Inner Dolphin area. The two are comparable when considering at the main geological boundaries, but the 3D data shows overall better imaging. An increase in acoustic impedance is shown as a black event (peak)

Discussion and conclusions

The Black Sea's Ukrainian waters stand as a promising frontier for future oil and gas exploration. The efficient acquisition and imaging of 3D seismic data over the Inner Dolphin area has provided a new data set to further develop and evaluate the prospectivity in the area. Utilizing SWIM, we were able to provide a high-resolution image of the shallow section which opens the option to also use the data set for wind farm site evaluation (Oukili et al., 2022) and hydrogen exploration. The next exploration stage is to acquire the same quality 3D seismic data over the Outer Shelf and adjacent deepwater domain bordering with Domino and Sakarya gas discoveries in Romanian and Turkish waters respectively.

Authors' contribution: Andrii Tyshchenko – writing, investigation, methodology, formal analysis, conceptualization, data curation, supervision; Andrii Vyzhva – investigation, visualization, data curation, formal analysis, supervision; Leonid Melnyk – supervision, validation, conceptualization, formal analysis; Jonas Fagerli Tegnander – investigation, writing, visualization, data curation; Lars-Erik Kittell – investigation, methodology, data curation; Kristian Svarva Helgebostad – investigation, visualization, data curation.

Acknowledgements, sources of funding

The authors would like to acknowledge Naftogaz of Ukraine and PGS for permission to share the results and thank colleagues of both companies for the successful collaboration to complete this milestone project. A special thanks to Prof. Dr. Martin Boekholt for supreme knowledge sharing and implementation of "one team"-culture between the teams. He will always be remembered!

References

- Carlson, D., Long, A., Söllner, W., Tabti, H., Tenger, R., & Lunde, N. (2007). Increased resolution and penetration from a towed dual-sensor streamer. *First Break*, 25, 71–77.
- Klochikhina, E., Crawley, S., Frolov, S., Chemingui, N., & Martin, T. (2020). Leveraging deep learning for seismic image denoising. *First Break*, 38(7), 41–48.
- Lu, S., Whitmore, D. N., Valenciano, A. A., & Chemingui, N. (2015). Separated-wavefield imaging using primary and multiple energy. *The leading edge*, 770–778. <https://doi.org/10.1190/tle34070770.1>
- Oukili, J., Karlsen, T. K., Caselitz, B., Beenfeldt, J., & McKay, A. (2022). Advanced imaging techniques provide new near surface details in 3D seismic exploration data and an application to new energy-related offshore shallow subsurface investigations. *First break*, 40, 69–73.
- Stovba, S., Stephenson, R., Tyshchenko, A., Fenota, P., Vengrovych, D., & Mazur, S. (2023). History of the geological development of the Ukrainian sector of the Black Sea from the middle Early Cretaceous to the beginning of the Late Miocene. *Geophysical Journal*, 3, 47. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i3.282411>
- Tauvers, P., Tyshchenko, A., Kitchka, O., Melnyk, L., & Boekholt, M. (2022, 6–7 September). Start of major 3D acquisition by Naftogaz in the Western Ukrainian Black Sea – implications for rejuvenation of offshore exploration for Ukraine. Abs. *AAPG Exploration and Production in the Black Sea Region and Super-Basin Thinking GTW. Trabzon*, 7.
- Whitmore, N. D., Valenciano, A. A., Sollner, W., & Lu, S. (2010). Imaging of primaries and multiples using a dual-sensor towed streamer. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 3187–3192.
- Yang, Y., Jaime, R., Whitmore D., Guanghui, H., & Nizar, C. (2021). Simultaneous inversion of velocity and reflectivity. *First break*, 39, 55–59.
- Yang, Y., Ramos-Martinez, J., Whitmore, D., Valenciano, A. A., & Chemingui, N. (2020). Full Waveform Inversion Using Wave Equation Reflectivity Modeling. *82nd EAGE Conference & Exhibition, Extended Abstracts* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202011146>

Отримано редакцією журналу / Received: 19.01.24

Прорецензовано / Revised: 29.05.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Андрій ТИЩЕНКО^{1,2}, канд. геол. наук
ORCID ID: 0000-0001-9640-2300
e-mail: Tyshchenko@naftogaz.com

Андрій ВИЖВА³, канд. фіз.-мат. наук
ORCID ID: 0009-0003-6699-5848
e-mail: andrii.vyzhva@ugv.com.ua

Леонід МЕЛЬНИК⁴, начальник відділу розвідки та виробництва
e-mail: MelnykLP@naftogaz.com

Йонас Фагерлі ТЕНАНДЕР⁴, гол. геофізик
e-mail: Jonas.Tegnander@pgs.com

Ларс-Ерік КІТТЕЛЛ⁴, керівник обробки зображень
e-mail: lars-erik.kittell@pgs.com

Крістіан Сварва ХЕЛЬГЕБОСТАД⁴, гол. геофізик
e-mail: Kristian.Helgebostad@pgs.com

¹НАК "Нафтогаз України", Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

³Науково-дослідний інститут "УкрНДІгаз", Київ, Україна

⁴PGS Exploration (UK) Ltd, Осло, Норвегія

СУЧАСНА СЕЙСМІЧНА 3D-ЗЙОМКА Й ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ НА НАДМАЛИХ ГЛИБИНАХ У ПІВНІЧНО-ЗАХІДНІЙ ЧАСТИНІ ЧОРНОГО МОРЯ

Вступ. Розглянуто проведення сучасної 3D-сейсмозондування та її оброблення (PSDM+FWI) на надмалих глибинах на ділянках внутрішнього шельфу Дельфін північно-західної частини Чорного моря. Незважаючи на глибини від 14 м до 40 м, було обрано ефективну систему збирання даних, що дало змогу оминати перешкоди на морському дні.

Методи. Технологія GeoStreamer допомогла отримати більше можливостей для оброблення сейсмічних даних. Відокремлені компоненти хвильового поля дали змогу застосувати передові технології оброблення даних. Одержані дані було опрацьовано сучасними алгоритмами часового та глибинного оброблення, включно із 3D-розділенням хвильових полів, дехостингом, послабленням кратних хвиль і шумів за допомогою машинного навчання.

Результати. Продемонстровано здатність фінальної глибинної швидкісної моделі міграції (FWI) фіксувати високошвидкісні та низькошвидкісні контрасти, що критично важливо для глибинної міграції. Зображення розділеного хвильового поля (SWIM) поліпшило візуалізацію морського дна, забезпечуючи відповідність батиметричним даним. Використовуючи SWIM, стало можливим отримати зображення мілководної ділянки з високою роздільною здатністю, що відкриває можливість використання цих даних для оцінювання місця розташування вітроелектростанцій і розвідки водню.

Висновки. Порівняння сейсмічних 2D- і 3D-даних вказує на вищу якість останніх, що має вирішальне значення для оцінювання вуглеводного потенціалу ділянки внутрішнього шельфу Дельфін. Наступне дослідження буде зосереджене на розвідці зовнішнього шельфу та прилеглих глибоководних ділянок, виділяючи українські води Чорного моря як перспективний район для розвідки вуглеводів. Отримані сейсмічні 3D-дані відіграють ключову роль для подальшого розвитку й оцінювання перспективності цієї ділянки, надаючи цінну інформацію в економічно ефективний спосіб.

Ключові слова: сейсмозондування, глибинна візуалізація, мілководдя, FWI, SWIM, PSDM, Чорне море, машинне навчання.

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 54.027:546.22:549.76:551.44
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.03>

Tofik AKHMEDOV, DSc (Geol. & Mineral.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0634-5600
e-mail: akhmedov.tofik@bk.ru

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

Lala KHALILOVA, PhD (Geol. & Mineral.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0003-0411-3216
e-mail: khalilovalala55@gmail.com

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

STRUCTURE AND LITHO-FACIAL FEATURES OF THE QALA SUITE DEPOSITS OF THE ZYKH-HOVSAN AREA ACCORDING TO 3D SEISMIC AND WELL LOGGING DATA

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

Background. A detailed study of the geological structure and litho-facial features of the deposits of the Pliocene productive series based on 3D seismic and Well Logging data is of great practical importance, as the main share of hydrocarbons produced in Azerbaijan occurs in these deposits.

The purpose of the research was to identify the features of the geological structure of the ZykH-Hovsan area, study the litho-facial properties deposits of the Qala Suite of the productive series, identify and study the deposits within the 3 formations of the Qala Suite based on a joint analysis of 3D seismic and Well Logging (WL) data.

Methods. Structural mapping based on seismic data was chosen as the main research method. In studying the Qala part of the section, seismogeological, seismostratigraphic and paleogeomorphological analyzes were also carried out.

Results. According to the contour of anomalies of lowered and enhanced values of medium amplitudes (reflected waves) RW of the SH (seismic horizons) and maps of temporary thicknesses, and in some cases along faults, in different parts of the ZykH-Hovsan area within the QaS formations, deposits were identified, their size and area were determined. Effective and oil saturated thicknesses were determined for each deposit. According to the last interval of testing and perforation in the wells drilled in the study area, as well as along the top of the water-saturated reservoir and along the bottom of the oil-saturated reservoir, absolute marks (a.m.) of oil-water contacts of the identified deposits were established. The nature of saturation was determined using WL data. The type of each deposit was also determined in the process of research.

Conclusions. In Qala deposits developed in the research area, the following were identified: one perspective trap in the QaS-3 formation, two traps in the QaS-2 formation and one trap in the QaS-1 formation at the ZykH field, which were identified on the basis of paleo-geomorphological features where it is suspected that the conditions for accumulation of sandy material are advantageous.

Keywords: litho-facial features, Qala Suite deposits, deposit, reservoir, effective thickness, oil saturated thickness, 3D seismic, structural maps.

Background

Studying the geological structure, establishing the paleo-geographic environment and litho-facial features of deposits is particularly important in the search for oil and gas traps of non-anticlinal type. Many researchers have studied the structure and conditions of sedimentation of deposits of the Productive Series (PS), which is of exploration interest in the area under consideration (Kovalevsky, Mirchink, Baturin, Aliev, Sultanov, Avdusin, Konyukhov, Potapov, Alizadeh, Mustafaev, Mehtiev, Reynolds, Hinds, Alieva, Mammadov, etc.). In the papers of these researchers, all judgements are reduced to the fact that the Paleo-Volga inflow of quartz-disthene-staurolite material occurred both from the Russian platform and from the mountain structures surrounding the South Caspian depression at that time (Alizade et al., 2018; Mamedov, 2008). Lithological and facies characteristics of the Lower Pliocene deposits show that they were deposited in a common basin with common paleo-geological, paleo-geographic conditions (Alikhanov, 1978).

The object of the current research was the ZykH-Hovsan area, which is located in the southern coastal part of the Absheron Peninsula (Fig. 1).

It is known that PS deposits within the ZykH-Hovsan area are subdivided on the basis of lithological composition into 9 lithostratigraphic complexes - from bottom to top: Qala Suite, Lower Kirmaky, Kirmaky, Upper Kirmaky Sandy, Upper Kirmaky Clayey Suites (lower part of the productive strata), Interruption (Fasila Suite), Balakhany, Sabunchi, Surakhany formations (upper part of the productive strata). The Balakhany Suite, in turn, is subdivided into 6 horizons from X to V.

The main prospects of the areas under research are associated with deposits of the Qala Suite, in the section of which a number of independent exploitation areas are

identified. The purpose of this research was to study the structure and litho-facial features of the Qala Suite deposits of the ZykH-Hovsan area based on seismic and WL data.

Methods

CDP-3D seismic surveys were carried out in the ZykH-Hovsan area in 2012. A total of 321 wells were drilled within the study area, of which 105 wells (for which we have complete information) penetrate Qala deposits (Akhmedov, 2017; Akhmedov, Aliyeva, & Abdurrahmanova, 2018). In studying the Qala part of the section, the main research method was structural mapping based on seismic data, which was supplemented by seismic geological, seismic stratigraphic, and paleo-geomorphological analyses (Aleksieva, & Vazaeva, 2023; Alsadi, 2017; Bembel et al., 2023; Korolkov, Mushin, & Chernov, 2001; Salaev, & Kastruyulin, 1977; Shimansky et al., 2011; Chopra, 2009; Sheriff, & Geldart, 1987; Urupov, 2004; Aghayeva, 2021). At the initial stage of study of the interval under consideration, the boundaries of productive layers of the Qala Suite were delineated for seismic referencing and mapping. Further, their correlation schemes were constructed along the well lines selected so as to evenly illuminate the entire drilled area. The final formation breakdowns were obtained with adjustments based on WL interwell correlation and seismic data.

Based on the correlation of seismic horizons and top elevations of formations and reservoirs, structural maps on a scale of 1:10000 were constructed for the Qala Suite-1 (QaS-1), Qala Suite-2 (QaS-2) and Qala Suite-3 (QaS-3) formations with oil and gas prospects. The maps are accompanied by diagrams of dynamic characteristics, temporary thicknesses, maps of effective and oil saturated thicknesses.

© Akhmedov Tofik, Khalilova Lala, 2024

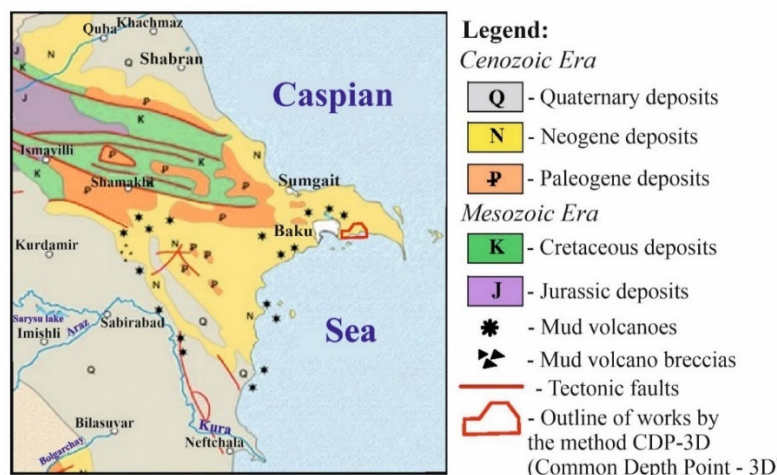


Fig. 1. Geological map of the study area (Geological map of Azerbaijan, 2010)

Results

Based on the seismic stratigraphic data, the correspondence of geological boundaries to reflections in the seismic field was determined and the reflected wave (RW) – geological reference series presented in the table was adopted (Fig. 2).

In the area under consideration, Qala Suite deposits are represented by alternating interlayers of clayey and sandy rocks and are subdivided into three formations: QaS-1, QaS-2 and QaS-3.

Sedimentation conditions for all three Qala Suite units (QaS-1, QaS-2, QaS-3) are similar, only the paleo-relief and the amount of transported material differ, which affected the

size and location of the formed traps. Filling of the traps with HC (hydrocarbon) migrating from the more submerged part of the basin occurred soon after the deposit of reservoir rocks. However, towards the end of accumulation of the productive strata, there was a rapid intensification of fold-forming movements, which continue to the present time, resulting in the active movement of groundwater and (in some places) in the destruction of the formed hydrocarbon deposits. A characteristic feature of anticlinal structures in the area under consideration is the presence of numerous tectonic disturbances and mud-volcanic manifestations that complicate their structure and have a significant impact on the destruction and change in the composition of formation fluids.

Seismic horizon (SH)	Geological reference point
SH-I	top of the Surakhany Suite of the Productive Series
SH-BS	top of the Balakhany Suite (BS) of the Productive Series
SH-UKC	top of the Upper Kirmaky Clayey (UKC) Suite of the Productive Series
SH-KS	top of the Kirmaky Suite (KS) of the Productive Series
SH-II	top of the Lower Kirmaky (LK) Suite of the Productive Series
SH-III	Qala Suite (QaS), top of the QaS-1 of the Productive Series
SH-QaS2	Qala Suite (QaS), top of the QaS-2 of the Productive Series
SH-IIIA	Qala Suite (QaS), top of the QaS-3 of the Productive Series
SH-IV	surface of Pontic deposits

Fig. 2. Seismic horizon (SH) and its corresponding geological reference point

Absence of commercial deposits and presence of signs of residual oil saturation beyond the contour of oil-bearing capacity within the fields indicate the ongoing process of deposit destruction. The character of distribution and fracture of oil and gas accumulations observed at the present stage is due to the influence of hydrogeological and hydrodynamic factors that appear after the formation of oil and gas deposits. This is evidenced by the uneven distribution of oil and gas deposits by area and depth. The contour of deposits in adjacent blocks within the same field has different hypsometric elevations.

Based on the mentioned above, we can assume high prospectivity of the structures located on the southeastern dip of the anticlinal zones of the basin. These structures on the fluid migration path are characterized by good structural-tectonic and lithological-facial conditions for hydrocarbon (HC) accumulation and accumulation. In addition, these structures have a number of advantages over the other folds

located upstream of the reservoirs. Over the entire history of formation, they only had an erosional stage of development; in the Upper Pliocene and Anthropocene, the structures were involved in general flexing and were not subjected to the destructive influence of tectonic and hydrogeological factors.

Taking into consideration the new seismic and reinterpreted well data, the deposits in the eastern and western parts of the Hovsan field are divided into independent objects. This division seems to be related to the paleo-relief and the amount of transported material. According to earlier research (Akhmedov, 2017), the boundaries for all deposits of the Qala Suite of the field were determined conditionally, due to the lack of more detailed seismic exploration at that time.

The QaS-3 formation was penetrated by 72 wells at the Hovsan field. The correlation of Qala Suite deposits in wells 1860–1856–1861 is shown in Fig. 3.

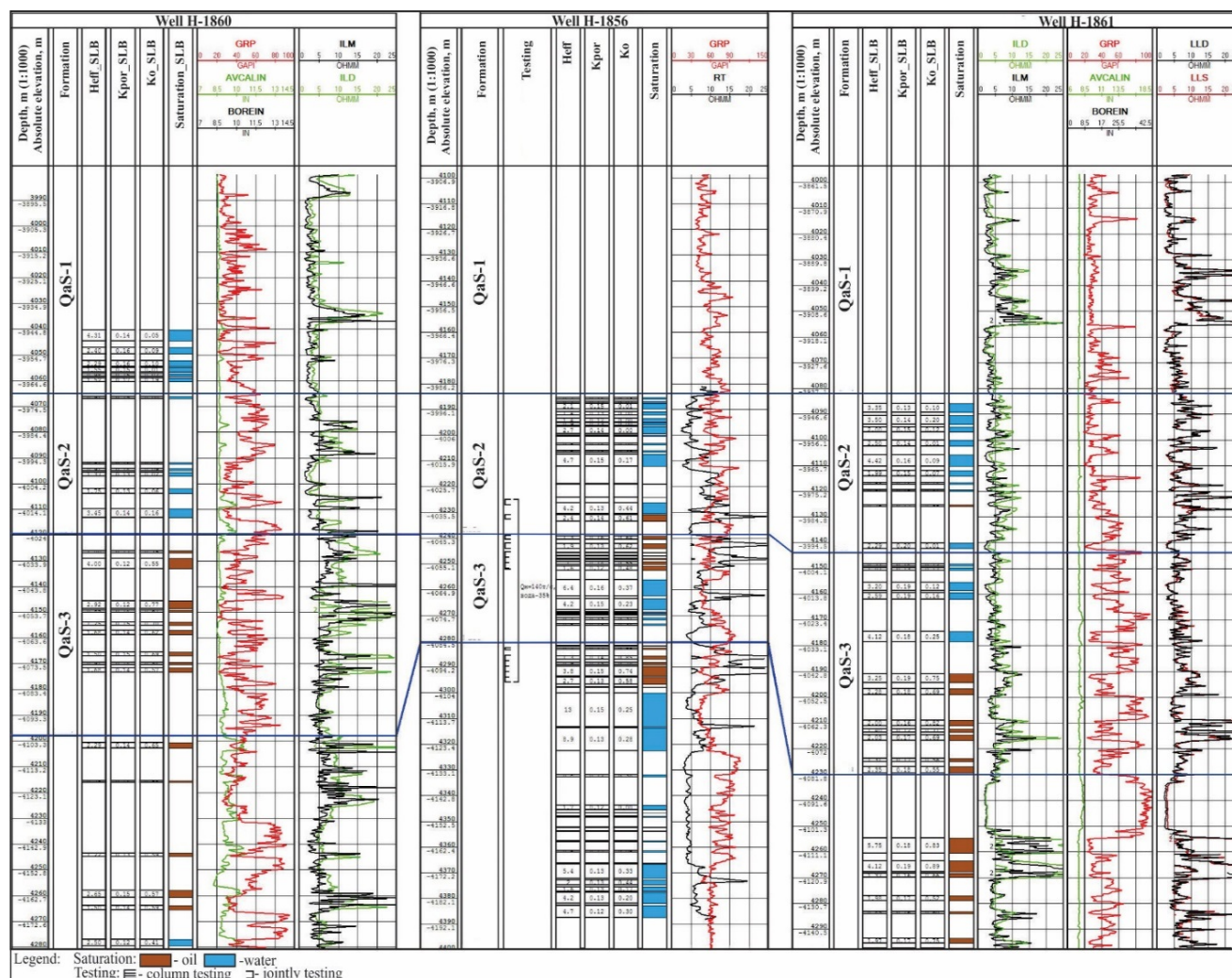


Fig. 3. Correlation scheme of Qala Suite deposits from wells 1860–1856–1861 (Hovsan field)

The QaS-3 formation is distributed over the entire area, only in the south-western and, partially, in the northern parts of the site there is an area of clayisation of the formation. Lithologically, the formation is characterized by the predominance of clays over sandy and silty rocks. The total thickness of the formation is 150–180 m, effective thickness varies from 5 m to 98 m, effective oil saturated thickness varies from 2 m to 20.9 m.

On the structural map of the seismic horizon-IIIa (SH-IIIa) (Fig. 4), confined to the top of the QaS-3 formation, the eastern limb of the Zyk antichlinal structure and the Hovsan syncline, which dips monoclinal to the east, is mapped. The entire area is complicated by numerous tectonic disturbances (zones of decompaction) of submeridian and sublatitudinal direction, identified both by temporary sections and by lowered values of the amplitude map. The depth range of the Lower Qala Suite deposits varies from -2160 to -4720 m.

There are 7 objects identified within the QaS-3 formation (Figs. 4, 5).

The deposit in the area of well 1829 was penetrated, accordingly, by well 1829. Effective thickness is 75 m, oil saturated part is 20 m. The deposit is delineated along the contour of the anomaly of lowered values of the SH-IIIa average RW amplitudes, and from the west by a fault delineated along the map of maximum RW amplitudes of

SH-IIIa. The size of the deposit is 0.21 x 0.40 km, the area is 42.3 thousand m². The conditional oil water contact (OWC) is assumed to be at the top of the water-saturated formation at a.m. -4402 m. The deposit is combined, lithologically and tectonically shielded.

Deposit in the eastern part of the Hovsan field (area of wells 1854, 1855, 1856).

It was penetrated by 27 wells, in which commercial oil inflows were obtained. Effective thicknesses vary from 18.4 m to 98.0 m, oil saturated part varies from 3.5 m to 31.9 m.

The northern boundary of the deposit is delineated along the contour of the paleo-uplift dome of the temporary thickness map with a boundary value of 123 ms. The paleo-uplift dome probably shows a decline in reservoir properties, and the main accumulations of sand bodies are probably confined to its slope. In the area of well 1816, located in the north-west part of the deposit, there is a zone of lowered instantaneous amplitudes RW of the SH-IIIa. From the west, the deposit is confined by faults; the southern boundary is along the outline of paleo-uplift (159 ms).

The dimensions of the deposit are 1.64 x 1.83 km, the area is 2,886 thousand m². The OWC is based on the results of sampling of well 1845 at 4273 m a.m. The deposit is combined, lithologically and tectonically shielded.

The following small-sized deposits were identified in the western part of the Hovsan field.

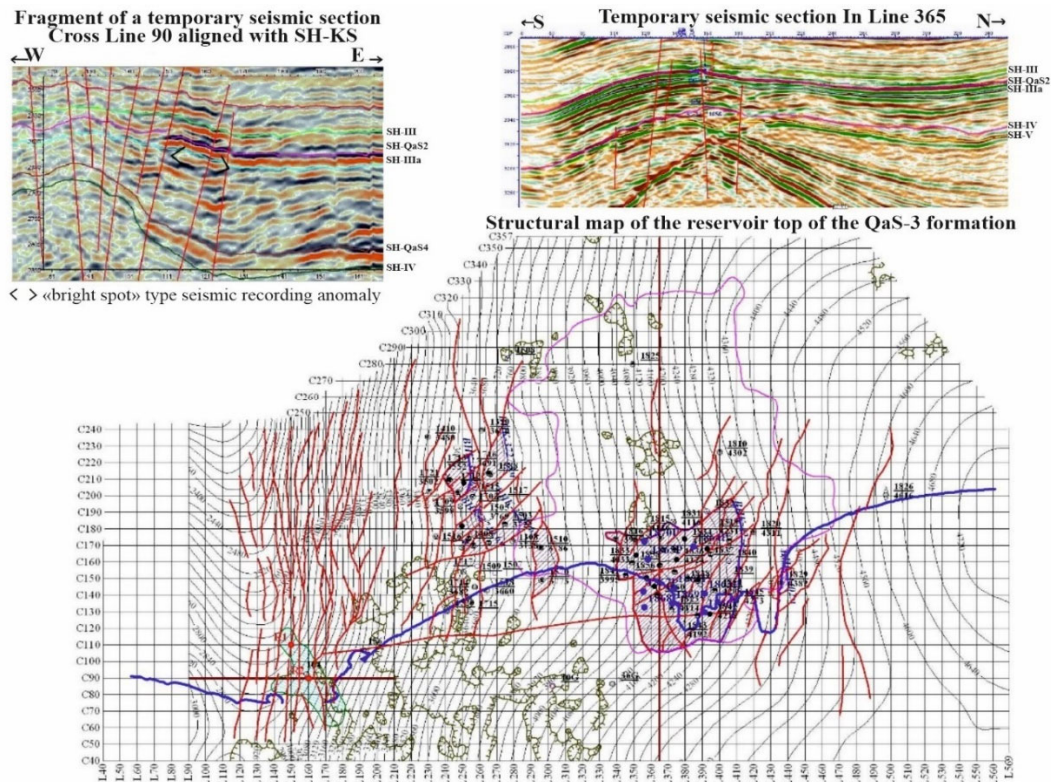


Fig. 4. Structural map of the reservoir top of the QaS-3 formation

The deposit in the area of wells 1510 and 1570 was penetrated by two wells 1510 and 1570, accordingly. The effective thickness is 58 m, oil saturated thickness is 17 m.

The deposit was identified by the results of sampling in well 1510 – oil inflow was obtained in the interval –3818.8 – –3819.0 m. Well 1570 is characterized as productive based on WL data. The dimensions of the deposit are 0.4 x 1.1 km, the area is 267 thousand m². The deposit is tectonically shielded.

The deposit in the area of well 1501 was penetrated by wells 1704 and 1501. Effective thickness is 41 m, oil saturated thickness is 34 m.

The deposit was identified based on WL data in wells 1501 and 1704, which are characterized as productive. The OWC is assumed to be at the bottom of the oil-bearing interval in well 1501 at a.m. –3748 m. The dimensions of the deposit are 0.3 x 0.7 km, and the area is 142 thousand m². The deposit is tectonically shielded.

In the area of wells 1713 and 1707, a small-sized deposit is identified. The effective thicknesses vary from 20.5 m to 36 m, the oil saturated thickness varies from 5.8 m to 28.6 m.

Tested in wells 1707, 1708, 1713, 1720.

During testing: well 1707 in the interval –3619.4 – –3629.4 m received oil inflow with flow rate of 50 tonnes per day, well 1708 in the interval –3618 – –3624 m also received oil inflow with flow rate of 58 tonnes per day.

The dimensions of the deposit are 0.4 x 0.74 km and the area is 168.7 thousand m².

The OWC is based on the last sampling interval in well 1707 at a.m. –3629.4 m. The deposit is tectonically shielded.

Deposit in the area of wells 1706, 1705, 1503. The deposit was penetrated by wells 1706, 1705, 1700, 1704, 1501, 1503. Effective thicknesses vary from 20.5 m to 36 m, oil saturated thickness varies from 5.8 m to 28.6 m.

Wells 1503, 1706 were tested.

When testing well 1706 in the –3594 – –3597.5 m interval, an oil flow rate of 40 tonnes per day was obtained, and well

1503 in the –3735.0 – –3740.0 m interval, an oil inflow with water was obtained. Wells 1501, 1503, 1704 and 1705 are characterized by WL data as productive.

In well 1501 the oil saturated reservoir bottom at a.m. is 3748.6 m, in well 1503 – at a.m. –3749.6 m. The conditional OWC is assumed for well 1503 at a.m. –3749.6 m.

The size of the deposit is 0.64 x 0.97 km, the area is 366.3 thousand m².

A deposit was identified in the area of wells 1716–1588 based on test results. The effective thickness is 13–17 m, oil saturated thickness is 5.4–7.7 m.

The OWC of the deposit is based on the last perforation interval in well 1588 at a.m. –3727.3 m. The dimensions of the deposit are 0.35 x 0.94 km, the area is 192 thousand m². The deposit is tectonically shielded.

In the west of the area under review, a potential trap, lithologically and tectonically shielded, was mapped within the Zykha field according to the anomaly of enhanced average RW amplitudes SH-IIIa. Its dimensions are 0.95 x 1.6 km and its area is 588.8 thousand m².

The QaS-2 formation was penetrated by 72 wells in the Hovsan field. At the Zykha field, the formation was penetrated by wells 130, 153 and 156 (Fig. 6). It is distributed over the entire area of the surveyed area.

Lithologically, the formation is represented by a homogeneous alteration of clays, sands and siltstones. The total thickness of the formation is 40–65 m, and in well 1720 it reaches 70.7 m. Effective thickness varies from 8.6 m to 45.4 m, effective oil saturation varies from 3 m to 42.7 m.

The structural map for SH QaS-2, which is confined to the top of the QaS-2 formation, shows an inherited monoclinical dip of the area to the east. Tectonic disturbances traced in SH IIIa are also observed at this level. The depth range of the Middle Qala Suite deposits varies from –2120 to –4680 m.

Five objects were identified within the QaS-2 formation (Figs. 6, 7).

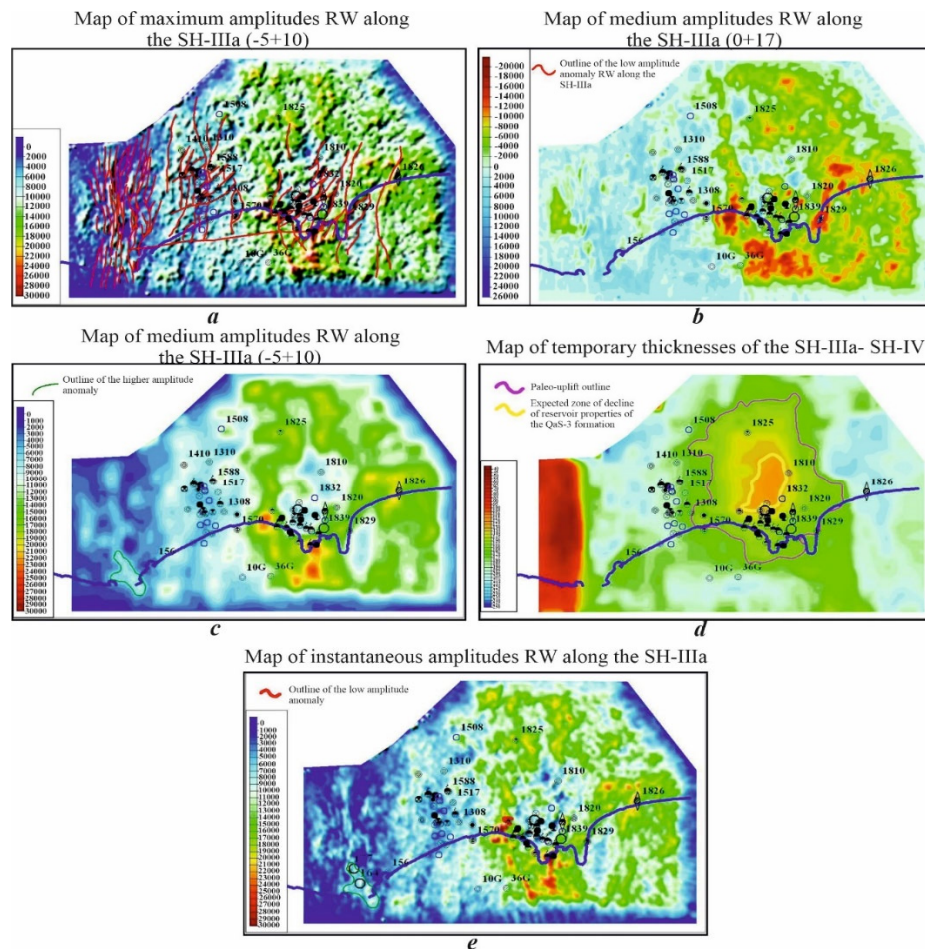


Fig. 5. Seismic and geological features of the QaS-3 formation:

a – Map of maximum amplitudes RW along the SH-IIIa; b – Map of medium amplitudes RW along the SH-IIIa (frame 0 + 17); c – Map of medium amplitudes RW along the SH-IIIa (-5 + 10); d – Map of temporary thicknesses of the SH-IIIa-SH-IV; e – Map of instantaneous amplitudes RW along the SH-IIIa

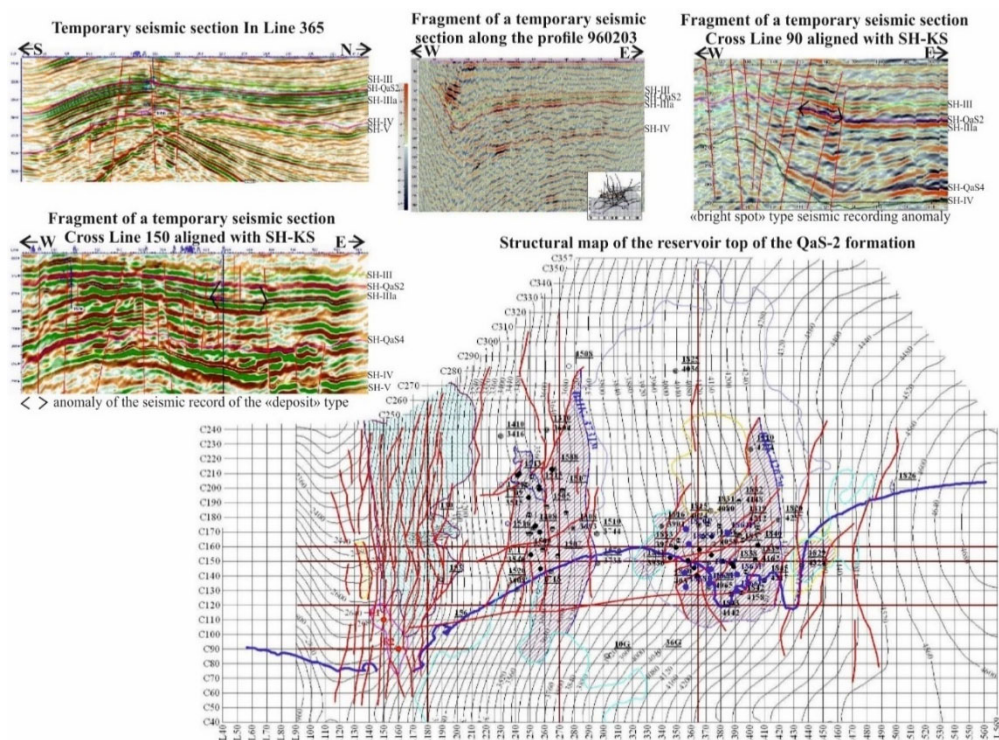


Fig. 6. Structural map of the reservoir top of the QaS-2 formation

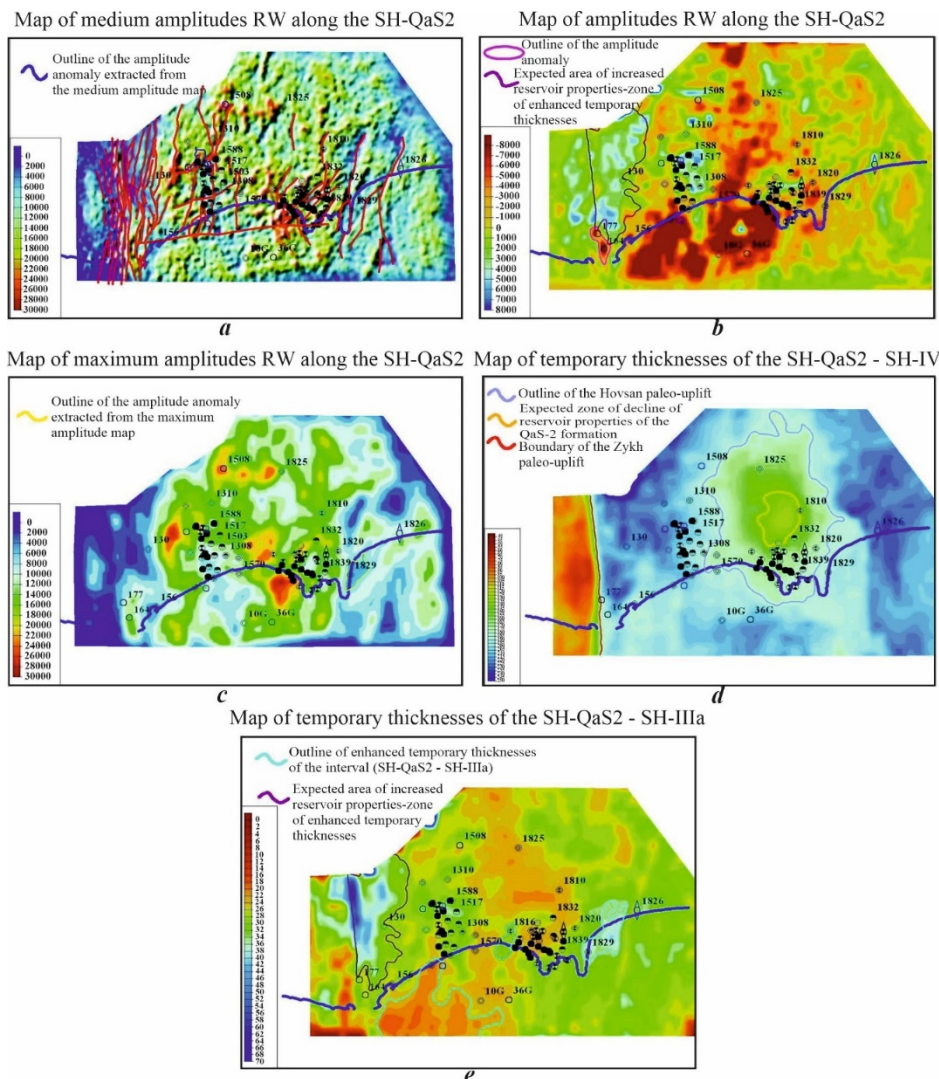


Fig. 7. Seismic and geological features of the QaS-2 formation:

- a – Map of medium amplitudes RW along the SH-QaS2; b – Map of amplitudes RW along the SH-QaS2;
c – Map of maximum amplitudes RW along the SH-QaS2; d – Map of temporary thicknesses of the SH-QaS2- SH-IV;
e – Map of temporary thicknesses of the SH-QaS2- SH-IIIa

The deposit in the area of well 1829 was discovered using WL data. Effective thickness in well 1829 is 39.6 m, oil saturated thickness is 39.6 m.

It was identified within the zone of increased temporal thicknesses between SH QaS-2 and IIIa by the boundary value of 35 ms. The presence of the potential zone here was also confirmed by the amplitude anomaly identified on the map of maximum amplitudes of RW of SH QaS-2.

The size of the deposit is 0.70 x 0.75 km, with an area of 367 thousand m². The deposit is lithologically and tectonically shielded.

The eastern deposit of the Hovsan field (in the area of wells 1816, 1856, 1855, 1845) was penetrated by 31 wells, in which commercial oil inflows were obtained.

Effective thicknesses vary from 3.0 m to 30 m, oil saturated thickness varies from 3.0 m to 27.4 m.

The northern boundary of the deposit is delineated along the contour of the proposed zone of reduced reservoir properties according to the map of temporary thicknesses with a boundary value of 140 ms. The deposit boundary in the area of well 1816, located in the north-west of the deposit, is delineated along the contour of the increased temporary thicknesses of SH interval QaS-2 – IIIa. From the south-west

the deposit is confined by faults, the southern boundary is delineated along the contour of 180 ms paleo-uplift.

The size of the deposit is 2.7 x 3.5 km and the area is 4,521 thousand m². The OWC is assumed to be at the top of the water-saturated interval in well 1820 at 4267 m. The deposit is combined, lithologically and tectonically shielded.

Western deposit of the Hovsan field (area of wells 1714, 1509, 1706, 1716, 1588). It was penetrated by 27 wells, in which commercial hydrocarbon inflows were obtained. Compared to the QaS-3 formation, this deposit is a single object. Effective thicknesses vary from 10.0 m to 45.0 m, oil saturated thickness varies from 5.0 m to 28.0 m.

The deposit is delineated by faults, amplitude anomaly (area of well 1720) according to the map of medium amplitudes RW of QaS-2, the southern boundary is along the boundary (22 ms) of the zone of enhanced temporary thicknesses of the interval SH QaS-2 - IIIa.

The dimensions of the deposit are 1.6 x 5.1 km and the area is 3,960 thousand m². The water saturated reservoir in well 1308 at a.m. –3731.0 m is assumed to be at the top of the water saturated reservoir. The deposit is lithologically and tectonically shielded.

To the south of it, an amplitude anomaly is identified on the medium amplitude map, along the outline of which a perspective trap is mapped. Its dimensions are 0.5 x 0.9 km and its area is 329.3 thousand m².

The QaS-1 formation was penetrated by 133 wells of the Zyk and Hovsan fields. It is spread over the entire area. Lithologically, the formation is composed of sandy and siltstone rocks with relatively thin clay interbeds that are not sustained along strike. The total thickness of the formation is 50–81 m and at the Zyk field in well 165 it is up to 125 m. The effective thickness varies: at the Zyk field from 15.7 m. to 53 m.; at the Hovsan field - from 8.2 m. to 41.8 m. Effective oil saturation varies: at the Zyk field within 4.5 m, 17.2 m to 37.3 m; at the Hovsan field – 3.0 m, 18.7 m to 30.6 m.

The structural plan at the SH-III stage, confined to the top of the QaS-1 formation, is conformable to the underlying

SH QaS-2. The depth range of the Upper Qala Suite deposits varies from 2040 m to 4640 m.

Six objects were identified within the QaS-1 formation (Figs. 8, 9).

The deposit in the area of well 1829 was discovered using WL data, which resulted in the delineation of oil-saturated reservoirs. The effective thickness is 30.1 m, oil saturated thickness is 11.0 m.

The reservoir was recognised within the amplitude anomaly identified on the map of amplitudes between RW III.

The conditional OWC is taken along the top of water-saturated reservoir of well 1829 at a.m. -4298.1 m.

The size of the deposit is 0.2 x 1.6 km and the area is 205 thousand m². The deposit is combined, lithologically and tectonically shielded.

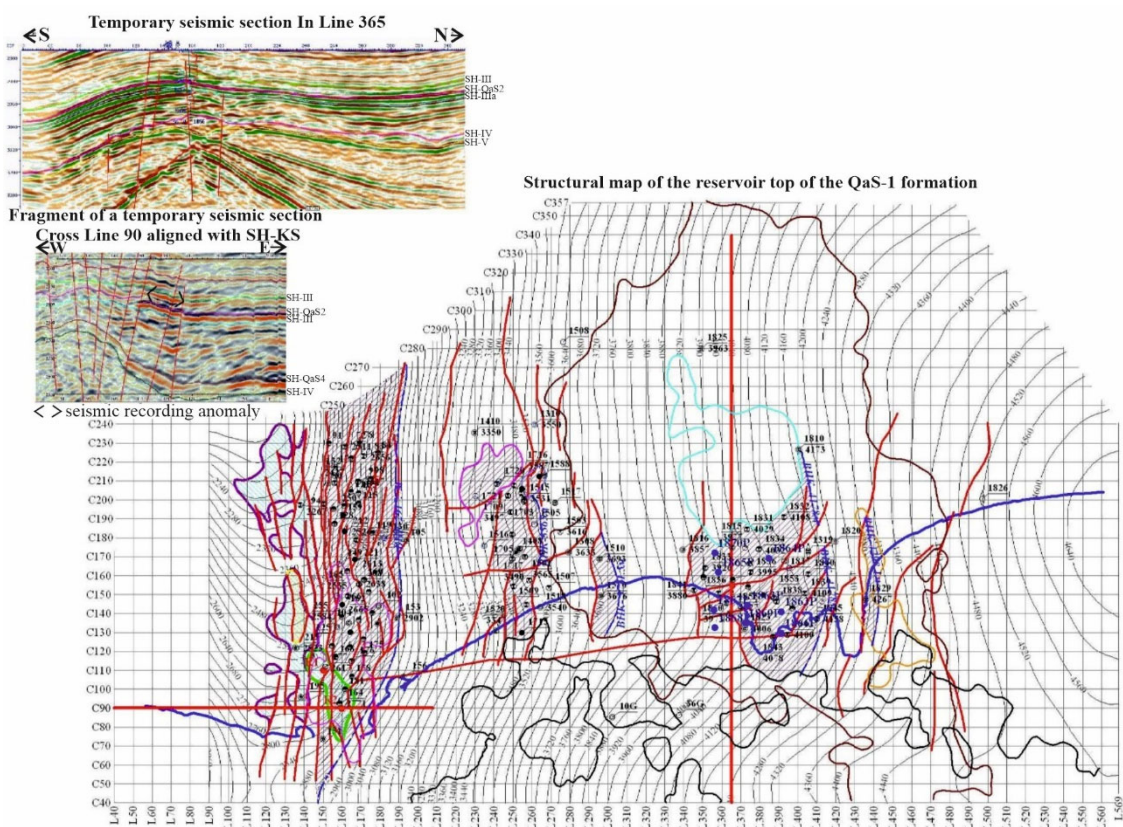


Fig. 8. Structural map of the reservoir top of the QaS-1 formation

Eastern deposit of the Hovsan field (area of wells 1856, 1855, 1845). It was penetrated by 28 wells, in which commercial oil inflows were obtained.

Effective thicknesses vary from 10.1 m. to 41.8 m, with oil saturated thicknesses ranging from 3.8 m to 30.6 m.

The northern boundary of the deposit is delineated along the contour of the proposed zone of reduced reservoir properties of the formation according to the map of temporary thicknesses between SH IV-III with a boundary value of 175 ms. The deposit boundary is delineated on the west by faults, and on the south by the outline of a lowered amplitude anomaly marked on the map of average RW III amplitudes.

The OWC is assumed to be at the top of the water-saturated reservoir in well 1810 at a.m. -4178 m.

The size of the deposit is 1.8 x 2.2 km, with an area of 2,871 thousand m². The deposit is combined, lithologically and tectonically shielded.

Deposit in the area of wells 1510, 1570. Revealed by WL results of wells 1510 and 1570, which are characterised as oil saturated. Effective thicknesses are 13.7 m and 15.5 m, accordingly, oil saturated thicknesses are 4.5 m and 7.0 m.

The deposit is delineated on the west by a fault, on the south by the contour of the paleo-uplift (200 ms).

The conditional OWC of the deposit is assumed to be at the top of the water-saturated reservoir of well 1570 at a.m. -3711.5 m.

The size of the deposit is 0.3 x 1.4 km, with an area of 345 thousand m².

Western deposit of the Hovsan field (area of wells 1714, 1509, 1706, 1716, 1588). It was penetrated by 26 wells, in which commercial hydrocarbon inflows were obtained. Effective thicknesses vary from 9.7 m to 29.5 m, oil saturated thicknesses vary from 3.0 m to 18.7 m.

The deposit is outlined by faults, anomalies of enhanced amplitudes (area of wells 1713, 1720), lowered values of

relative impedances (area of wells 1716, 1588), and in the south the boundary is carried out along the contour of the anomaly of lowered values of amplitudes.

The size of the deposit is 0.8 x 2.9 km, with an area of 1,619 thousand m².

The OWC is assumed to be at the top of a water-saturated reservoir in well 1501 at a.m. -3565 m. The deposit is lithologically and tectonically shielded.

Eastern deposit of the Zyk field (area of wells 253, 255, 164). It was penetrated by 54 wells with commercial hydrocarbon inflows obtained during testing.

Effective thicknesses are 8.3 m, 37.3 m, 53 m oil saturated varying from 4.5 m to 37.3 m.

The deposit expands to the north and is confined by faults to the west.

The size of the deposit is 1.0 x 5.5 kilometres, with an area of 4,170 thousand m².

The conditional OWC of the deposit is accepted at the bottom of the oil-saturated reservoir of well 153 at a.m. -2917.7 m. The deposit is tectonically shielded.

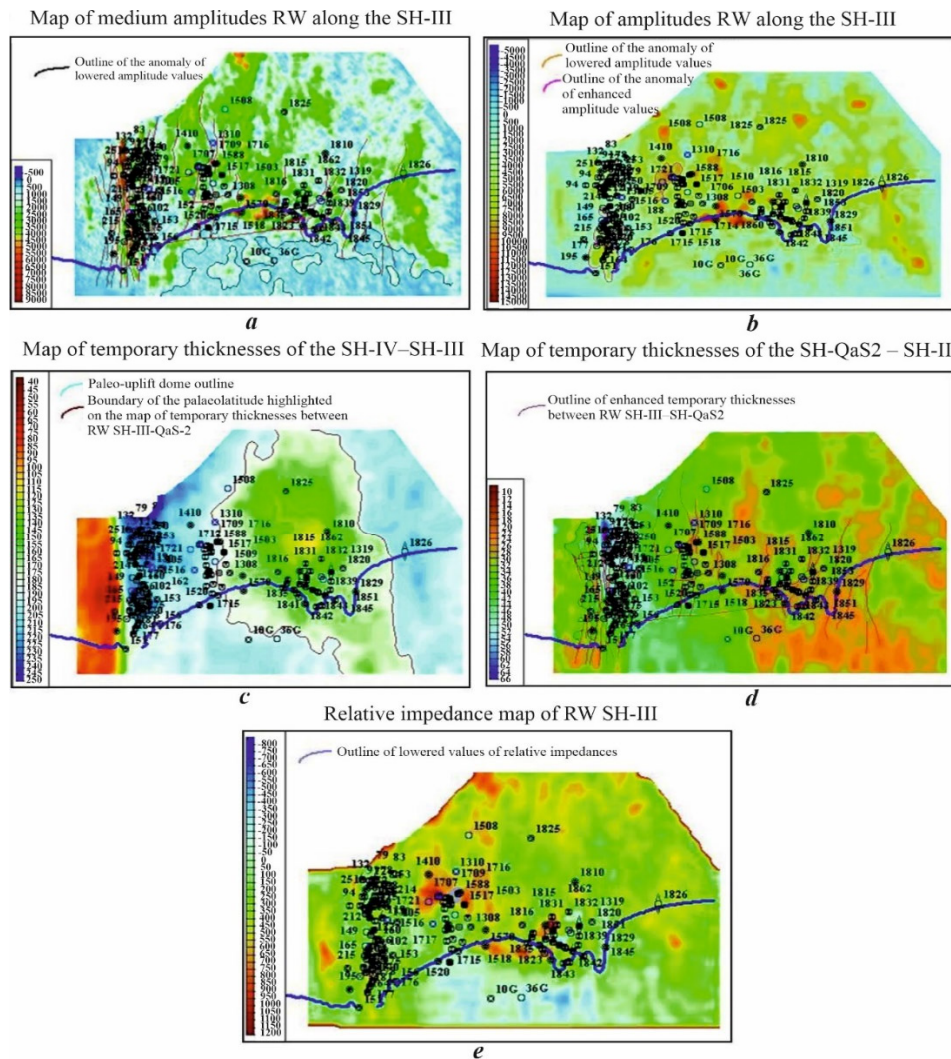


Fig. 9. Seismic and geological features of the QaS-1 formation:

- a – Map of medium amplitudes RW along the SH-III; b – Map of amplitudes RW along the SH-III;
c – Map of temporary thicknesses of the SH-IV-SH-III; d – Map of temporary thicknesses of the SH-QaS2 – SH-III;
e – Relative impedance map of RW SH-III

Within the eastern deposit of the Zyk field, an enhanced anomaly is outlined on the RW III amplitude map.

In the western part of the Zyk field, the map of temporary thickness between SH III and QaS-2 shows an area of increasing thickness, along which a potential trap QaS-1 is mapped. Wells 94, 215 and 195 were penetrated. Oil, gas and water flows were obtained in the intervals 2649.6–2653.6 m and 2657.6–2660.6 m in well 195. Wells 94 and 215 are characterized as oil saturated according to WL data.

The dimensions of the trap are 1.0 x 3.6 km, with an area of 1,591 thousand m². The trap is lithologically and tectonically shielded.

Discussion and conclusions

On the basis of the joint analysis of time sections and constructed structural maps, maps of maximum amplitudes of RW SH-IIIa, medium amplitudes of RW SH-IIIa, instantaneous amplitudes of RW SH-IIIa, temporary thicknesses of SH-IIIa-SH-IV in the Zyk-Hovsan area, tectonic disturbances of submeridian and sublatitudinal direction were identified, deposits were revealed and their size, type and other characteristics were determined.

During the survey, 7 objects were outlined within the QaS-3 reservoir, 5 objects within QaS-2, and 6 objects within QaS-1.

Combined, lithologically and tectonically shielded deposits were identified in the eastern part of the Hovsan field. In the western part of the Hovsan field, as well as in the eastern and western parts of the Zykha field, the trap type is lithologically and tectonically shielded.

In Qala deposits developed in the research area, the following were identified: one perspective trap in the QaS-3 formation, two traps in the QaS-2 formation and one trap in the QaS-1 formation at the Zykha field, which were identified on the basis of paleo-geomorphological features where it is suspected that the conditions for accumulation of sandy material are advantageous.

In our judgement, trap formation occurred within the southeastern and western slope parts of the paleostructure, where oil deposits of the Hovsan field were subsequently discovered.

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

References

- Aghayeva, M. A. (2021). Joint analysis of seismic and well log data applied for prediction of oil presence in Maykop deposits in Naftalan area. *AIMS Geosciences*, 7(3), 331–337. <https://doi.org/10.3934/geosci.2021020>
- Akhmedov, T. R., Aliyeva, G. A., & Abdurrahmanova, S. T. (2018). Geological structure of the Hovsan-Zykha area in the light of 3D seismic survey data for Pontian and Miocene sediments and their oil and gas opportunities. *Vector of Geosciences*, 1(4), 15–27 [in Russian]. [Ахмедов, Т. Р., Алиева, Г. А., & Абдурахманова, С. Т. (2018). Геологическое строение площади Говсаны-Зых в свете данных сейсморазведки 3Д по отложениям понта и миоцена и перспективы их нефтегазоносности. *Вектор геонаук*, 1(4), 15–27].
- Akhmedov, T. R. (2017). Effective thickness and Miocene deposits productivity on Absheron oilfields of Hovsan block, Azerbaijan, Using 3D seismic survey. *Oil and Gas Geology*, 4, 103–107 [in Russian]. [Ахмедов, Т. Р. (2017). Нефтегазоносность ПТ и миоценовых отложений на площади Говсан Азербайджана по сейсмическим данным 3Д. *Геология нефти и газа*, 4, 103–107].
- Alekseeva, O. A., & Vazaeva, A. A. (2023). Application of CDP 3D seismic exploration in the search for oil and gas traps in the northern part of the Timan-Pechora oil and gas province. *Geology and geochemistry of combustible minerals*, 5, 43–54 [in Russian]. [Алексеева, О. А., & Вазаева, А. А. (2023). Применение сейсморазведки МОГТ 3Д при поисках ловушек нефти и газа в северной

части Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. *Геология и геохимия горючих полезных ископаемых*, 5, 43–54].

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

Alsadi, H. N. (2017). 3D Seismic Reflection Surveying. In: *Seismic Hydrocarbon Exploration. Advances in Oil and Gas Exploration & Production*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-40436-3_7

Bembel, S. R., Fedorov, M. Yu., Ivanchik, A. V., Valeeva, A. R., & Bembel, R. M. (2023). The use of 3D seismic survey data in clarifying the geological structure and forecasting the prospects of oil-bearing capacity of complex deposits of Western Siberia. *Oil industry*, iss. 2 [in Russian]. [Бембель, С. Р., Фёдоров, М. Ю., Иванчик, А. В., Валеева, А. Р., & Бембель, Р. М. (2023). Использование данных сейсморазведки МОГТ 3Д для уточнения геологического строения и прогноза перспектив нефтегазоносности сложно-построенных залежей Западной Сибири. *Нефтяное хозяйство*, т. 2]. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2023-2-60-65>

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

Korolkov, Yu. S., Mushin, I. A., & Chernov, A. A. (2001). *Identification and mapping of disjunctive dislocations using exploration geophysics methods. Scientific world* [in Russian]. [Корольков, Ю. С., Мушин, И. А., & Чернов, А. А. (2001). *Выявление и картирование дизъюнктивных дислокаций методами разведочной геофизики*. Научный мир].

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

Salaev, S. G., & Kastyulin, N. S. (1977). *The role of tectonic ruptures in the formation of oil and gas deposits in Kobystan*. Elm [in Russian]. [Салаев, С. Г., & Кастрюлин, Н. С. (1977). *Роль тектонических разрывов в формировании нефтегазовых залежей Кобыстана*. ЭЛМ].

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

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

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

Отримано редакцією журналу / Received: 10.11.23

Прорецензовано / Revised: 15.04.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Тюфік АХМЕДОВ, д-р геол.-мінерал. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-0634-5600

e-mail: akhmedov.tofik@bk.ru

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

Лала ХАЛІЛОВА, канд. геол.-мінерал. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0003-0411-3216

e-mail: khalilovalala55@gmail.com

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджан

БУДОВА ТА ЛІТО-ФАЦІАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ВІДКЛАДІВ КАЛАКСЬКОЇ СВИТИ ЗИХ-ГОВСАНСЬКОЇ ПЛОЩІ ЗА 3Д-ДАНИМИ СЕЙСМОРОЗВІДКИ ТА КАРОТАЖУ

Вступ. Детальне вивчення геологічної будови та літо-фаціальних особливостей відкладів пліоценової продуктивної серії на основі 3Д-даних сейсморозвідки та каротажу свердловин має важливе практичне значення, оскільки основна частина вуглеводнів, що видобуваються в Азербайджані, припадає на ці родовища.

Метою досліджень було виявлення особливостей геологічної будови Зих-Говсанської площі, вивчення літо-фаціальних властивостей відкладів калакської свити продуктивної серії на основі спільного аналізу 3Д-даних сейсморозвідки та каротажу свердловин (WL).

Методи. Як основний метод дослідження обрано структурне картування за сейсмічними даними. Під час вивчення розрізу також проводили сейсмогеологічний, сеймостратиграфічний і палеогеоморфологічний аналізи.

Результати. За контуром аномалій знижених і підвищених значень середніх амплітуд відбитих хвиль сейсмічних горизонтів і картами часових потужностей, а в окремих випадках і за розломами, у різних частинах Зих-Говсанської площі визначено QaS-пласти й ідентифіковано родовища, з'ясовано їх розміри та площу. Для кожного покладу визначено ефективні та нафтонасичені товщі. За даними останнього інтервалу випробувань і перфорації в свердловинах, пробурених на досліджуваній території, а також за верхом водонасиченого пласта і за вибосм нафтонасиченого пласта, встановлені абсолютні позначки нафто-водоконтракту виявлених родовищ. Характер насичення визначали за даними каротажу. У процесі дослідження також було встановлено тип кожного родовища.

Висновки. У родовищах Qala, що розробляються на території досліджень, виявлено одну перспективну пастку в пласті QaS-3, дві пастки в пласті QaS-2 й одну пастку в пласті QaS-1 на родовищі Зих на основі палеогеоморфологічних особливостей, де можливо припустити, що умови для накопичення піщаного матеріалу сприятливі.

Ключові слова: літо-фаціальні особливості, відклади калакської свити, родовище, колектор, ефективна товщина, нафтонасичена товща, 3Д-сейсморозвідка, структурні карти.

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: 622.11: 550.4 (477)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.04>

Богдан КРУГЛОВ¹, магістр
ORCID: 0000-0002-7899-2957
e-mail: bkr12@ukr.net

Сергій ЛЕВОНЮК², д-р філософії (науки про Землю)
ORCID: 0000-0002-4073-8152
e-mail: sergii.levonyuk@gmail.com

Святослав ЮРАС³, асп.
ORCID: 0009-0004-4715-2914
e-mail: svyuras@gmail.com

Іван КАРПЕНКО^{4,5}, канд. геол. наук
ORCID: 0000-0001-7753-9010
e-mail: karpenko.i.geoscience@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²УкрНДІгаз, філія АТ "Укргазвидобування", Київ, Україна

³Інститут геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

⁴АТ "Укргазвидобування", Київ, Україна

⁵Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України, Київ, Україна

ОГЛЯД ВІЗЕЙСЬКИХ КОЛЕКТОРІВ НЕТРАДИЦІЙНОГО ТИПУ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ ТА ПОРІВНЯННЯ З ПІВНІЧНОАМЕРИКАНСЬКИМИ НЕТРАДИЦІЙНИМИ ФОРМАЦІЯМИ

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

Вступ. Сучасний прогрес видобутку вуглеводнів зі сланцевих і щільних порід, а саме вдосконалення технологій горизонтального буріння та проведення багатостадійного гідророзриву пласта за економічно обґрунтованими вартостями, відкриває нові горизонти для розвідки та розробки нафти і газу в усьому світі. Важливість сланцевої нафти і газу викликала інтерес у всьому світі після великого успіху видобутку в Північній Америці. Пропонована стаття є продовженням серії публікацій, присвячених вивченню візейських нетрадиційних колекторів у межах Дніпровсько-Донецької западини. У ній розглянуто візейські відклади, а саме нижньовізейська карбонатна плита XIII МФГ (горизонти В-24-25), та "рудівські верстви", кременисті кальцитизовані збагачені на органіку сланці (В-23) у межах виявлених перспективних зон Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), що оцінюються щодо потенціалу розробки нетрадиційних колекторів, використовуючи метод аналогії з успішними Північноамериканськими формаціями.

Методи. Порівнювались ключові геологічні та геохімічні показники з обраними аналогами, а саме: геологічний вік, умови осадконакопичення, літологія і товщина відкладів, геохімічні дані (загальний вміст органічного вуглецю (ТОС), коефіцієнт відбиття вітриніту (Ro), генераційні властивості порід згідно із піролітичними дослідженнями та зрілістю породи), мінералогічний склад і пористість.

Результати. Відповідно до проведеного дослідження, візейські нетрадиційні відклади ДДЗ чітко корелюють з найпродуктивнішими родовищами газу з нетрадиційних колекторів (сланці, збагачені органікою карбонати) в Північній Америці. Глибина залягання та геологічне положення візейських нетрадиційних об'єктів загалом зіставні з Північноамериканськими аналогами або дещо вищі за них, зважаючи на наявні дані; товщини відкладів перебувають у схожих діапазонах. З позиції мінералогічного складу, а саме за даними рентгено-структурного аналізу (XRD), рудівські верстви схожі до сланців Барнетт і Вудфорд, карбонатні горизонти В-24-25 відповідають формації Ігл-Форд. Високий середній вміст ТОС для горизонту В-23 (до 10 % ваг.) можна порівняти зі сланцями Баккен і Вудфорд.

Висновки. Геологічні та геохімічні параметри візейських горизонтів, розглянутих у цій роботі, є багатонадійними з погляду перспектив розробки нетрадиційних колекторів для збільшення енергоресурсної бази України. Однак для того, щоб з упевненістю зробити висновки щодо економічної рентабельності розробки досліджуваних об'єктів, необхідне детальніше вивчення з урахуванням результатів буріння та випробування після проведення багатостадійного гідралічного розриву порід.

Ключові слова: материнська порода, нетрадиційні колектори, загальний вміст органічного вуглецю, сланцевий газ, рудівські верстви, термальна зрілість.

Вступ

Нині в Україні існує проблема, що стосується розроблення шляхів щодо швидкого нарощування енергетичної ресурсної бази країни. Як відомо, більшість антиклінальних структур у межах ДДЗ уже ідентифіковано, значна кількість родовищ унаслідок обводненості поступово втрачає свій потенціал. Методи інтенсифікації не завжди підвищують видобуток до бажаного рівня, а перехід на зелену енергетику буде поступовим та, на жаль, довготривалим процесом. Тож тепер для розв'язання проблеми збільшення енергоресурсів звертають дедалі більшу увагу на розробку колекторів нетрадиційного типу. З розвитком сучасних технологій видобутку, серед яких багатостадійний гідралічний розрив порід, удосконалення технології горизонтального буріння, прогрес у лабораторних аналізах зернового матеріалу тощо, починаючи з 2011 р., набуває популярності й розмаху розроблення нетрадиційних і щільних колекторів (рис. 1).

Як відомо, нетрадиційний поклад вуглеводнів – це нафтогазоматеринська порода, колектор і пастка одночасно. Колектор має характерну низьку пористість і проникність (Вижва та ін., 2019). У ролі колектора слугують зазвичай сланцеві або щільні карбонатні відклади. Нетрадиційні поклади істотно вплинули на видобування нафти та газу в таких країнах, як США, Аргентина, Канада, Китай, Саудівська Аравія та ін.

Саме розроблення колекторів нетрадиційного типу сприяло енергетичній "революції" у США, де вже в 2018 р. кількість пробурених горизонтальних свердловин перевищила кількість вертикальних і нині має колосальну перевагу (рис. 2). Видобуток сланцевого газу та нафти у країні збільшився з < 5 млрд куб. футів на добу сухого газу та < 0,5 млн барелів нафти на добу у 2005 р. до 65 млрд куб. футів на добу сухого газу та > 7,0 млн барелів на добу у 2018 р. (Energy Information Administration, 2019).

© Круглов Богдан, Левонюк Сергій, Юрас Святослав, Карпенко Іван, 2024

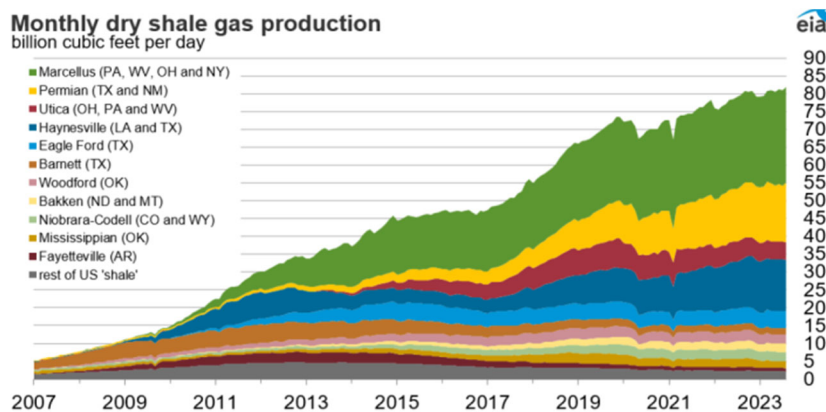


Рис. 1. Діаграма видобутку сланцевого газу в США
(Energy Information Administration, 2019)

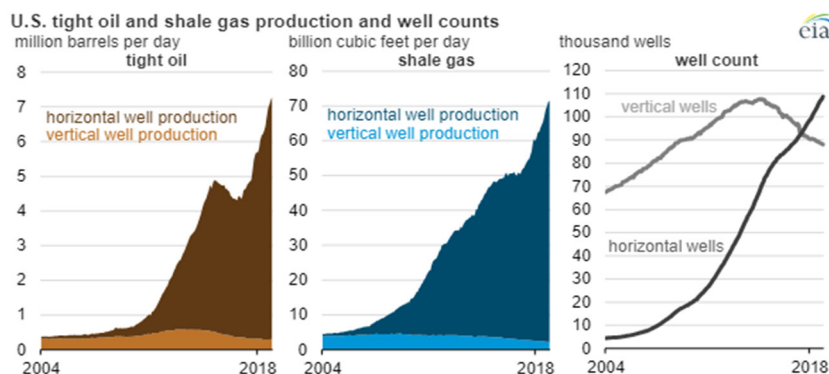


Рис. 2. Діаграма видобутку нафти та газу з колекторів нетрадиційного типу та масштаби горизонтального буріння в США
(Energy Information Administration, 2019)

Розробка сланцевого газу в США є наслідком поєднання багатьох сприятливих факторів. Це геологічні та природні умови, а також володіння передовими технологіями. Політика заохочення розвитку сланцевого газу є адекватною, синхронною, детальною та прозорою. Вона спрямована на захист довкілля та створення довіри і прийняття у громадськості. Це також вимагає розвиненої інфраструктури, включно з мережею трубопроводів для транспортування та розподілу природного газу, що сприяють зниженню собівартості. Бум сланцевого газу в США став потужним каталізатором для інших країн, що мають його потенційні ресурси. Визнаючи важливість природного газу як джерела енергії перехідного періоду, уряди кількох країн мають значні стимули для того, щоб повторити успіх США у своїх країнах. Досвід Сполучених Штатів у розвідуванні, розробці та видобутку сланцевого газу може бути корисним для інших країн у розвитку власної газовидобувної галузі. Аналіз і порівняння умов, що сприяють розробці сланцевого газу в країнах/зонах, які мають потенційні ресурси сланцевого газу та бажання розробляти сланцевий газ, покаже потенціал розвитку зазначених ресурсів у цих країнах/зонах. Крім того, у багатьох нещодавніх дослідженнях нетрадиційних покладів нафти і газу, щодо яких бракує надійних даних (напр., у Пакистані, Австралії та Китаї, а також у США), у ролі аналогів використовують сланцеві родовища Сполучених Штатів (De Silva et al., 2015; Sohail et al., 2022; Li et al., 2020). Спираючись на фактори, що сприяють успіху сланцевого газу в США, ми проаналізували й оцінили умови для розвідки та розробки нетрадиційних колекторів в Україні, а саме в ДДЗ. Пропонована стаття є продовженням серії публікацій, присвячених вивченню візейських нетрадиційних колекторів у межах Дніпровсько-

Донецької западини (Iuras et al., 2023, 2024; Levoniuk et al., 2023, 2024; Kruhlov et al., 2023).

Багато досліджень було зосереджено на структурах пор, середовищах розробки та розподілення колекторських властивостей у щільних нафтогазоносних породах багатьох регіонів (Liang et al., 2011; Kuang et al., 2012). Проте вчені висловлюють менше занепокоєння щодо нафтових покладів у щільних пластах, оскільки вони вважають, що нафта у щільних пластах накопичувалася поблизу або в материнських породах. Типовою характеристикою для щільних пластів є те, що пласт над материнською породою має щільний резервуар, де нафта не контролюється плавучістю і може мігрувати лише на коротку відстань. Гарним прикладом є поклади в басейні Анадарко для міссісіпського вапнякового нафтового пласта, у якому вуглеводень мігрує з нижнього багатого органікою мергелю та нижнього вудфордського аргіліту, а високопродуктивний резервуар є зазвичай ділянкою з відносно добре розвиненим доломітом у верхній частині формації Міссісіпі. Для горизонтів, що розміщуються під материнською породою, материнські породи перекривають щільні нафтові колектори, а нафта долає плавучість і мігрує в нижні суміжні пласти під дією різниці тиску між материнськими породами та резервуарами. У доломітових нафтових горизонтах Три Форкс у басейні Віллстон нафта в основному утворюється у високоякісних материнських породах формації Нижній Баккен (Nordeng, & Helms, 2010). Сланцеві горизонти Баккен є високоякісними материнськими породами, а доломіт Три Форкс, що лежить під генеруючими сланцями, також використовується як нижній резервуар. Для пластів біля генеруючих порід існує очевидна латеральна відмінність між материнськими породами та щільними нафтовими

колекторами, і нафта з материнських порід мігрує латерально у щільні колектори.

Для покладів, розташованих між генеруючими породами, також зустрічаються ущільнені породи як основні. Нафтові пласти Баккен, що лежать у щільних шарах басейну Віллістон, ілюструють цей феномен. Тут середня частина представлена набором щільних вапнякових колекторів з алевролітовими прошарками, тоді як верхня та нижня частини складаються зі сланцевих високоякісних материнських порід, що формують "сендвіч". У деяких інших нафтових родовищах, приурочених до щільних колекторів, літологія зазнає значних змін у вертикальному напрямку через складну геологічну будову, що призводить до наявності різних комбінацій порід, які можна класифікувати за розрізами. Наприклад, сланці Ігл-Форд у басейні Мексиканської затоки є генеруючими породами, тоді як доломітовий нафтовий резервуар Буда є нижнім, а крейдяний колектор Остіна, що розміщується вище, – верхнім резервуаром. Досвід розроблення цих об'єктів відкриває нові перспективи щодо освоєння щільних нижньовізейських карбонатних порід, що залягають під рудівськими верствами в ДДЗ, урахуваючи останні дослідження, які демонструють, що ці відклади мають високий нафтогазогенераційний потенціал і в перспективних зонах мають достатню зрілість для самостійного генерування вуглеводнів.

Об'єкт дослідження. Дніпровсько-Донецький нафтогазоносний басейн – це палеозойський рифтовий басейн, один з великих тектонічних елементів Східноєвропейської платформи, складова частина Сарматсько-Туранського лінеаменту. Його вважають супербасейном із понад 200 родовищами вуглеводнів (Kabyshv et al., 1998). Основною характеристикою ДДЗ є центральний грабен, що заповнений товщею інтенсивно дислокованих осадовувулканогенних відкладів девонського періоду, а також осадових відкладів кам'яновугільного й пермського періодів, які розчленовані на блоки. Від бортів до центральної частини цієї западини фундамент поступово занурюється, він перекритий палеозойськими, мезозойськими й кайнозойськими осадовими відкладами. Товщина цих відкладів у межах бортів становить 500–3500 м, а у грабені – понад 15 000 м (Старостенко та ін., 2017). Соляна активність, тектонічна реактивація та ерозійні події в пермі та пізній крейді/палеоцені відбувалися під час пострифтової стадії (Stephenson et al., 2006).

Згідно з попередніми дослідженнями, у розрізі ДДЗ виділяється ряд основних нафтогазоматеринських формацій, як вугленосних (середньокам'яновугільні, раньосерпуховські та раньовізейські), так і приурочених до сланцевих і щільних карбонатних порід морського генезису (серпухівські, візейські, турнейські, девонські) (Лукін, 2011; Sachsenhofer et al., 2010; Misch et al., 2018).

Встановлено взаємозв'язок згаданих вугленосних і глинистих серпухівських та верхньовізейських формацій з деякими родовищами в межах ДДЗ (Misch et al., 2016). Також з'ясовано, що девонські відклади є найважливішими материнськими породами у межах Прип'ятського прогину та, найімовірніше, відіграють значну роль у генерації вуглеводнів у ДДЗ (Misch et al., 2016; Вакарчук та ін., 2013). Однак чимало дослідників (В. Гавриш (Gavrish, Machulina, & Kurilenko, 1994), С. Мачуліна, І. Бабко (Мачуліна, & Бабко, 2004), В. Михайлов, І. Бабко, О. Лукін (Лукін та ін., 2020), В. Макогон (Макогон, 2008), В. Огар (Огар, 2012), Я. Лазарук (Лазарук, 2012), І. Карпенко, О. Карпенко (Karpenko et al., 2021), С. Юрас, С. Левонюк та ін.) усе ж вважають товщу порід у верхньому-нижньому візі з високим вмістом органічної речовини

(В-23 рудівські верстви, карбонатні відклади В-24-25) найбільш продуктивною в Дніпровсько-Донецькому басейні щодо генерації вуглеводнів.

У пропонованій роботі досліджено візейські відклади, а саме нижньовізейська карбонатна плита XIII МФГ (горизонти В-24-25) та рудівські верстви, кремністі, кальцитизовані, збагачені на органіку сланцеві породи (В-23) у межах виділених (Levoniuk et al., 2023) перспективних зон 1, 2 ДДЗ (рис. 3).

Розріз нижнього карбону в ДДЗ характеризується великою кількістю трансгресивно-регресивних циклів, контрольованих тектонікою та евстатичними коливаннями рівня моря (Дворянін та ін., 1996). Ці цикли охоплюють глибоководні та мілководні морські, багаті на органіку, глинисті та карбонатні відклади, зокрема й досліджувані об'єкти (горизонти В-23 та В-24-25). Різноманітний мінералогічний склад порід свідчить про мінливість умов седиментації. Рудівські верстви належать до фації кремнисто-карбонатно-глинистих бітумінозних відкладів депресійних ділянок морського басейну з безкисневим або збідненокисневим режимом. У розрізі вони залягають на морських органогенних карбонатних відкладах горизонту В-24-25 і перекриваються поліфаціальними утвореннями: пн.-зх. частина ДДЗ – уламковий матеріал, пов'язаний з активною річковою діяльністю; пд.-сх. частина ДДЗ – органогенні карбонатні відклади. Латерально в бік бортів западини ці відклади заміщаються мілководно-шельфовими та прибережно-морськими теригенними або вуглистими породами. У розрізі переважають масивні бітумінозні аргіліти однорідної текстури та бітумінозні шаруваті аргіліти. Фоліація переважно спричинена чергуванням різних за складом і структурою шарів, окремо збагачених пелітовим, алевритовим, кремнистим і вуглецевим матеріалом, а також бітуминою речовиною. Вони характеризуються широкими варіаціями співвідношень органічної речовини з глинистим, а також кремнистим, вуглистим, фосфатним і дисульфідно-залістим матеріалом, мікршаруватими текстурами (із широким розвитком шаруватих варіацій) (Sachsenhofer, & Koltun, 2012).

Типові значення сучасного загального вмісту органічного вуглецю (ТОС) у рудівських верствах коливаються від 6–10 % ваг. (Зона 1) до 4–8 % ваг. (Зона 2), збільшуючись у напрямку від бортів до центральної частини басейну. Згідно з попередніми дослідженнями за даними піролізу Rock-Eval, органічна речовина сланцевих відкладів горизонту В-23 представлена переважно керогеном III–II типу, з початковим водневим індексом (HI), що перевищує 400 мгВВ/гТОС. На домінування II типу керогену також вказують петрографічні описи шліфів, у породі виявлено велику кількість планктону (радіолярії тощо), ідентифіковано значний вміст піриту, що вказує на безкисневі глибоководні умови. У деяких зразках існує також значна домішка керогену типу I, переважно пов'язаного з водоростями, які утворюють карбонат-домінантні відклади зазначених порід. Глибина цих відкладів у межі Зон інтересів 1, 2 становить зазвичай 4–5 км зі зменшенням у південно-східній частині південної прибортової частини ДДЗ до 2,0–3,5 км. Товщини порід збільшуються в напрямку занурення в басейн та коливаються у межах Зон 1, 2 у середньому в інтервалі 20–40 м. При цьому зрілість порід за відбивною здатністю вітриніту на тій самій глибині 4,5 км збільшується з $R_o = 0,8–1,0$ % (головне нафтове вікно) у Зоні 1 до $R_o = 1,3–1,6$ % (вікно вологого газу) Зони 2. Вміст глинистих мінералів зазвичай не перевищує 40 %. Пористість зменшується від середніх значень 6–11 % у межах Зони 1 до 4–7,5 % у Зоні 2 через більший вміст карбонатних мінералів у межах останньої.

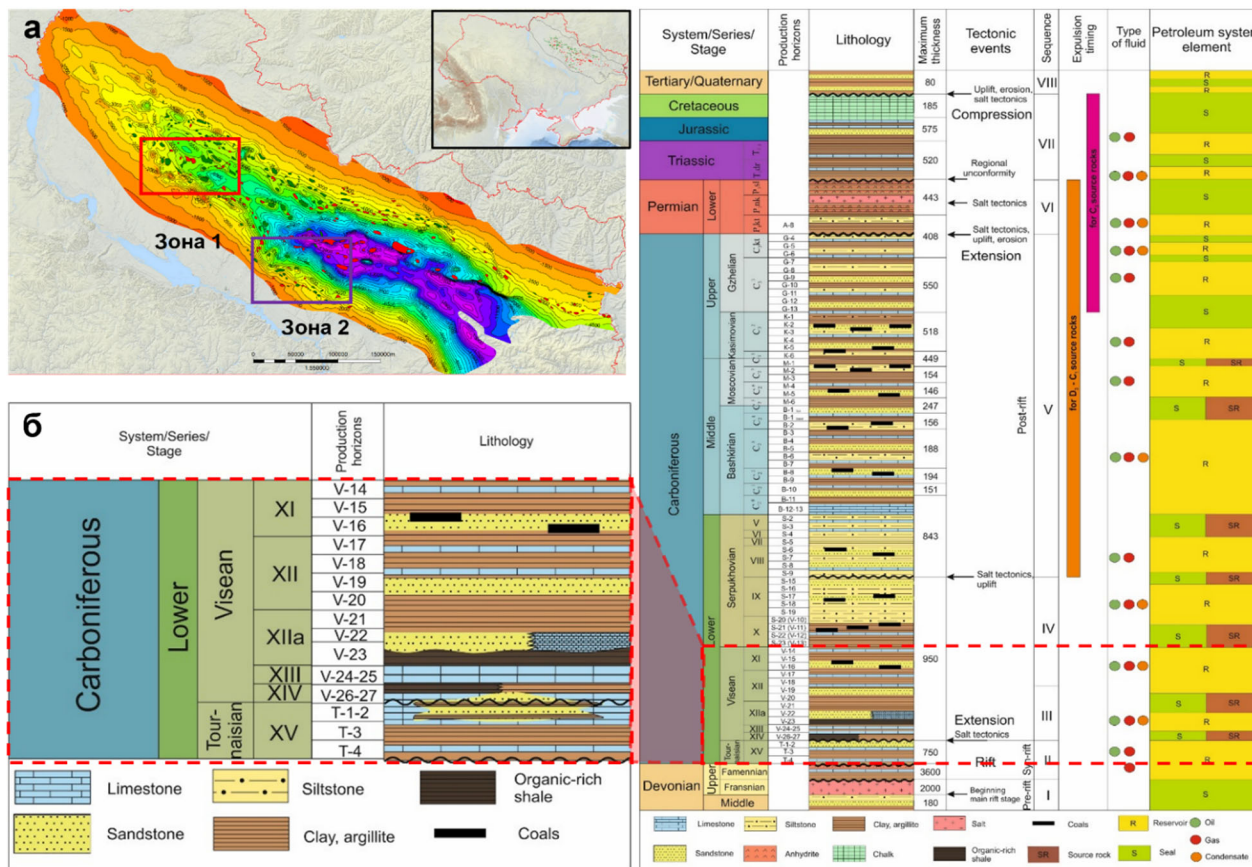


Рис. 3: а – структурна карта покрівлі нижнього візе ДДЗ із виділеними перспективними зонами; б – літолого-стратиграфічна колонка розрізу ДДЗ з елементами нафтогазової системи (Levoniuk et al., 2023)

Горизонти В-24-25 останнім часом теж привертають значну увагу науковців, серед яких А. Вакарчук, В. Огар та ін. Хоча в деяких роботах досліджено вуглеводневий потенціал цих товщ (Вертюх, 2019), усе ж зазначене питання досі залишається відкритим для вивчення. Ці відклади переважно сформовані вапняками від ясно- до темно-сірих, що перешаровуються з аргілітовими прошарками. Вапняки від повнокристалічних до приховано-кристалічних, без глинистих домішок до глинистих різновидів, шламо-детритові, з рештками кріноїдей, брахіопод, коралів. Різновиди вапняків тріщинні, кавернозні. Однак для них характерна низька пористість (від 1 % до 6 %, в основному 1–3 %), що створює додаткові складнощі у процесі розроблення цих товщ. Особливу увагу для розробки нетрадиційних колекторів привертають відклади глибокої шельфової фації, утворені в основному темно-сірими біокластовими пелюїдними уламковими вакстоунами / пакстоунами (~50–90 % карбонатних мінералів), а у верхній частині під рудівськими верствами – чорними карбонат-домінуючими мадстоунами, високорадіоактивними, збагаченими на органічні речовини (типові середні значення ТОС коливаються від 1 до 4 % ваг.) (Levoniuk et al., 2023). У межах глибокого шельфу та у приосьовій частині басейну товщина нижньовізейських карбонатів перевищує 300 м, знижуючись до менш ніж 50 м на мілководному шельфі поблизу південно-західного борту западини. Більша глибина моря на глибоководному шельфі та в басейні сприяла безкисневим умовам, що, зі свого боку, зумовлювало значне збереження органічної речовини.

Методи

Метод аналогії. Результати досліджень візейських нетрадиційних колекторів було порівняно з деякими

Північноамериканськими сланцевими та карбонатними формаціями, що є одними із найуспішніших проєктів з реалізації розробки колекторів нетрадиційного типу. Попри те, що деякі роботи вже містили попередній порівняльний аналіз деяких геологічних і геохімічних характеристик для досліджуваних горизонтів (Михайлов та ін., 2014; Karpenko, 2016; Ohar, 2012; Kruhlov et al., 2023), визначається необхідність у розширенні цього аналізу та детальніше розкриття відмінностей і подібностей між об'єктом дослідження та попередніми висновками. Здійснено порівняння ключових геологічних параметрів цих формацій з перспективними об'єктами ДДЗ, а саме: палеогеографічні умови, умови осадконакопичення, петрофізичні та геохімічні характеристики, порівняльний аналіз літології за даними рентгено-структурного аналізу. За попереднім аналізом було обрано п'ять формацій для детальнішого вивчення, а саме: сланці Баккен у басейні Віллістон, сланці Барнетт у басейні Форт-Ворт, вудфордські сланці в басейні Анадарко, сланці Хейнсвілла в басейні Хейнсвілл-Боссє та формація Ігл-Форд у басейні Меверік (рис. 4). Унаслідок цього підходу було отримано нові відомості та висновки, що сприяють глибшому розумінню характеристик досліджуваних формацій.

Сланці Баккен, Басейн Віллістон (Bakken Shale, Williston Basin). Сланці Баккен – це велике сланцеве утворення, розташоване в басейні Віллістон, що охоплює частини Північної Дакоти, Монтани та Саскачевану (Канада). Умови осадконакопичення сланцевих порід Баккен характеризуються складною історією відкладення, що охоплює численні морські трансгресії та регресії протягом пізнього девону до раннього Міссісіпію. Баккенську формацію сформовано з двох материнських

порід (верхні баккенські та нижні баккенські сланці) і середнього баккенського колектора, що представлений зі змішаних за літологією порід, серед яких пісковик, доломіт і вапняк (Eker et al., 2014) (рис. 5). Сланці Баккен є неоднорідними і являють собою складну суміш кварцу,

карбонатів, іліті, смектиту та піриту. Уміст ТОС коливається від 3 до 13 % ваг. (Jarvie et al., 2007). Високий вміст ТОС вказує на аноксидне середовище дна моря Барнетт, у якому були відсутні бактерії, що зазвичай атакують і руйнують органічну речовину.



Рис. 4. Карта сланцевих формацій США (Energy Information Administration, 2019)

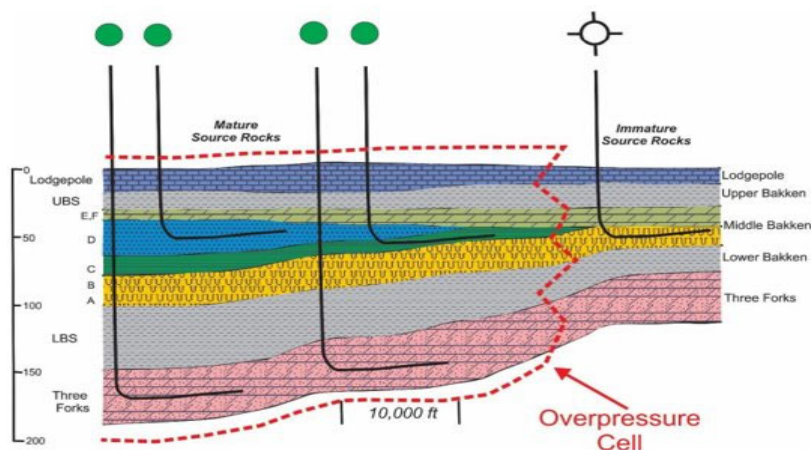


Рис. 5. Схематичний розріз, що демонструє видобуток вуглеводнів із формацій Баккен (Sonnenberg, 2017)

Сланці Барнетт, Басейн Форт-Ворт (Barnett Shale, Fort Worth Basin). Сланці Барнетт – це відоме сланцеве утворення, розташоване в басейні Форт-Ворт, який розміщений у північно-центральної частині Техасу (рис. 6). Умови осадконакопичення сланців Барнетта вказують на те, що вони були відкладені у глибоководному материковому басейні, який мав слабку циркуляцію з відкритим океаном. Протягом більшої частини історії басейну придонні води були евксинними, що створювало середовище, сприятливе для збереження органічних речовин. Це привело до формування багатого на органіку материнської породи (Robert et al., 2007). Сланці Барнетта сформовані переважно з кварцу, глинистих мінералів (серед яких іліт, смектит і змішаний шар іліту/смектиту), карбонатних мінералів (кальцит і доломіт), польового шпату, піриту і сидериту (Bowker, 2007). Загальний вміст органічного вуглецю в сланцевих породах Барнетт у середньому становить близько 3–5 % ваг. і складається переважно з керогену типу II, схильного до нафтоутворення. Нафта і

супутний газ спочатку утворилися внаслідок розкладання керогену, тоді як супутний газ, видобутий зі сланців Барнетт на більшій площі родовища Ньюарк-Іст, утворився за вищої термічної зрілості ($R_o = 1,1\%$) як наслідок вторинного крекінгу нафти й бітуму. Сланцеві породи Барнетт мають велику товщину (91 м), лежать у межах нафтогазогенераційного вікна ($R_o = 1,1\%$), перекриваються вапняками Марбл-Фоллз і підстилаються вапняками Віола-Сімпсон (Pollastro et al., 2007).

Сланці Вудфорд, Басейн Анадарко (Woodford Shale, Anadarko Basin). Вудфордські сланці – це значне сланцеве утворення, розташоване в басейні Анадарко, що охоплює частини Оклахоми і Техасу (рис. 7). Це осадові гірські породи, які утворилися в період від пізнього девону до раннього Міссісіпі, приблизно 360–320 млн років тому. Вудфордські сланці сформовані переважно із дрібнозернистих аргілітів і багатих на органіку сланців, із вкрапленнями незначної кількості карбонатів й алевролітів. Умови відкладення Вудфордських сланців свідчать

про глибокі анаеробні умови морського дна під час глобальної трансгресії рівня моря, що дало змогу зберегти органічну речовину і розвинути багаті на вуглеводні материнські породи (Burgess, & Hatch, 1989). Сланцева матриця Вудфордської формації сформована із глинистих мінералів, серед яких є іліт, змішаного шару іліту/сметкиту, каолініту, карбонатів, а також кварцу й органічного

матеріалу (Abousleiman et al., 2008). Глибини до верхньої частини зони у вікні генерації коливаються від приблизно 1700 м на північному сході до 4000 м у глибшій частині басейну на південному заході. На цих глибинах Вудфордський сланець лежить у межах вікна генерації вуглеводнів, зрілість якого зростає з північного сходу на південний захід як функція глибини.

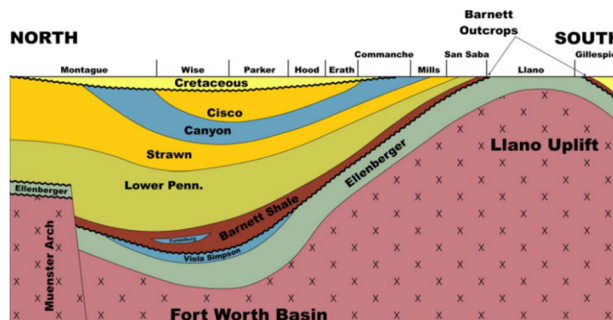


Рис. 6. Схематичний розріз через басейн Форт-Ворт. У північних частинах Барнетт розділений на верхню і нижню формації Форестбурзькими вапняками (Bruner, & Smosna, 2011)

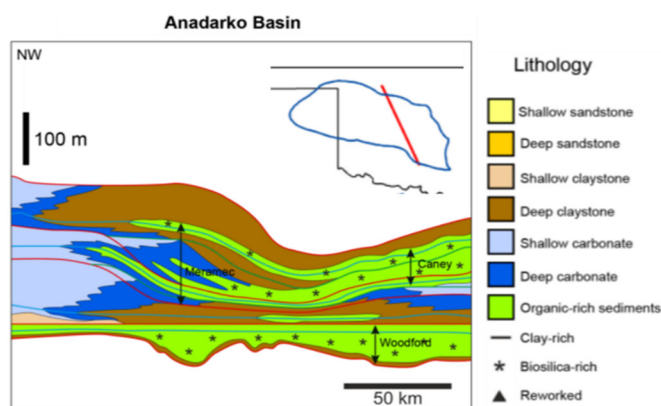


Рис. 7. Концептуальна стратиграфічна діаграма товщ девонсько-міссісіпського інтервалу на родовищі Анадарко (Bromhead, & Butt, 2018)

Сланці Хейнсвілла, Басейн Хейнсвілл-Боссє (Haynesville Shale, Haynesville-Bossier Basin). Сланці Хейнсвілла – це відоме сланцеве утворення, розташоване в басейні Хейнсвілл-Боссє, що переважно охоплює частини Луїзіани, Техасу й Арканзасу (рис. 8). Це термічно зріла, багата на органіку гірська порода, що виникла в період з пізньої юри до ранньої крейди, пов'язана з трансгресією другого порядку, що відклала багаті на органіку чорні сланці по всьому світу, приблизно 150–170 млн років тому (Klemme, 1994). Сланці Хейнсвілла сформовані переважно з багатих на органіку аргілітів і сланців, переважаних тонкими шарами алеволітів і пісковиків. Умови відкладення сланців Хейнсвіллського родовища вказують на морське середовище, яке характеризується відносно глибокою водою і низьким рівнем кисню, що

сприяє збереженню органічних речовин і формуванню багатих на вуглеводні материнських порід (Hammes et al., 2011). Зазначені умови існували в багатому на мул басейні, який зазнавав періодичного припливу каламуті й уламкових потоків з карбонатного шельфу. Апвелінг відбувався вздовж внутрішньобасейнових максимумів і карбонатного шельфу, про що свідчить вміст фосфатів у всіх розрізах. Сланцева матриця формації Хейнсвілл сформована із глинистих мінералів, переважно іліту та сметкиту, а також кварцу, кальциту та піриту. Поклади Хейнсвілла характеризуються надлишковим тиском, пористістю в середньому від 8 до 12 %, водонасиченістю (Sw) від 20 до 30 %, нанорозмірними проникностями, товщиною пласта від 70 до 100 м і початковим видобутком до 30 млн куб. футів на добу. Глибина залягання пласта коливається від 3000 до 4700 м.

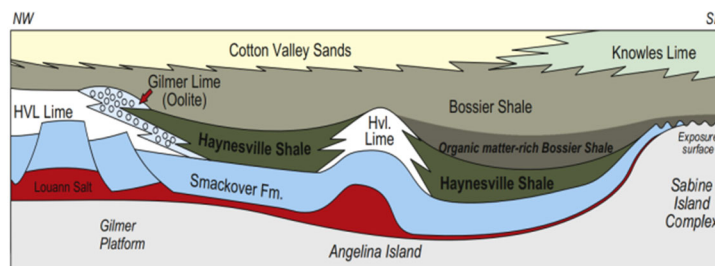


Рис. 8. Схематичний стратиграфічний розріз через верхньоярський басейн східного Техасу, що демонструє різні літологічні середовища і назви формацій від шельфу до басейну (Hammes, & Frebourg, 2012)

Формация Ігл-Форд, Басейн Маверік (Eagle Ford Formation, Maverick Basin). Формация Ігл-Форд – це відома морська, багата на органіку, муліста карбонатно-сланцева формація, розташована в Південному Техасі, що простягається через кілька округів (рис. 9). Це гірська порода пізньої крейди, що утворилася приблизно 86–93 млн років тому. Формация Ігл-Форд – це багаті на органіку вапняні сланці, які місцями переходять в органічний аргіліт, але літологія може бути дуже мінливою і містити бітум, інертні похідні органічні речовини та дисперсний вітриніт (Hackley, & Cardott, 2016). Умови

відкладення формації Ігл-Форд вказують на перехідну морську обстановку, де відкладення відбувалося в різних умовах – від мілководного шельфу до глибоководного басейну (Sun et al., 2016). Сланцева матриця формації Ігл-Форд сформована із глинистих мінералів, серед яких іліт, змішаний шар іліту/сметкиту та хлориту, а також кварц, карбонатні мінерали й органічні речовини. Коефіцієнт відбиття вітриніту формації Ігл-Форд у межах басейну Маверік коливається від (приблизно) 1,0 % на глибині 2400 м (нафтове вікно) до 1,4 % на глибині 3500 м (газове вікно).

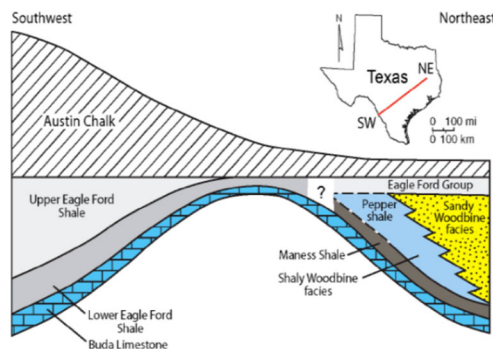
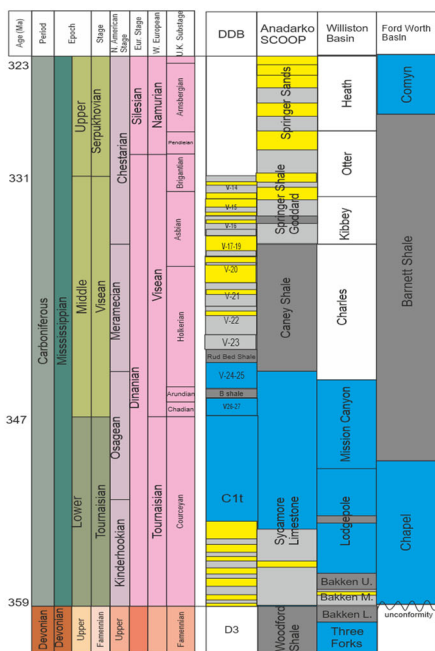


Рис. 9. Схематичний південно-західно-північно-східний розріз, що ілюструє регіональні літолого-стратиграфічні та літофаціальні взаємозв'язки в межах групи Ігл-Форд (Hentz, & Ruppel, 2010)

Результати

Порівняння (Умови осадконакопичення). Детальне дослідження геологічних умов формування нетрадиційних колекторів у цих басейнах дало змогу виокремити деякі закономірності. Три з п'яти об'єктів відкладалися приблизно в однаковий час – це пізньодевонський і раньоміссісіпський період, інші дві формації приурочені до мезозойської ери, хоча умови осадконакопичення визначалися як досить подібні. Більшість із цих аналогів (за винятком сланців Хейнсвілл та Ігл-Форд мезозойської ери) були відкладені в палеозойську еру (рис. 10). Північноамериканські сланці відкладалися в

затоплених материкових басейнах уздовж колізійних окраїн у палеозойську еру, а в мезозойську еру – у напівзакритих басейнах уздовж загальної рампоподібної обстановки рифтової окраїни (Eoff, 2013; Goldhammer, 1998). Умови осадконакопичення характеризуються від мілководних до глибоководних умов седиментації з переважно характерним аноксидним й анаеробним середовищем, що сприяло відкладенню та збереженню достатньої кількості органічної речовини та виникненню високих показників загального вмісту органічного вуглецю (TOC > 1 %), що створюють гарний генераційний вуглеводневий потенціал для цих товщ.



Схематична генералізована стратиграфічна колонка

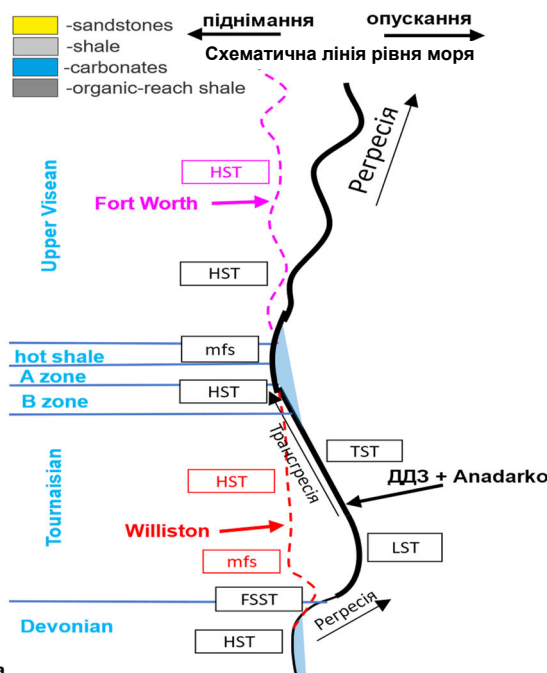


Рис. 10. Схематична генералізована літолого-стратиграфічна колонка ДДЗ та деяких Північноамериканських басейнів зі схематичною лінією рівня моря

Глибини залягання продуктивних товщ досліджуваних аналогів коливаються в межах 2–4 км (рис. 11). Розроблення нетрадиційних колекторів достатньо економічно затратний процес, оскільки зазвичай виконується шляхом горизонтального буріння із застосуванням багатостадійного гідравлічного розриву пласта (ГРП) та використанням додаткових методів інтенсифікації. Зважаючи на всі ці фактори, економічна доцільність розроблення нетрадиційних об'єктів у США характеризується глибиною їхнього залягання, що не перевищує 4500 м.

Товщини відіграють важливу роль через специфіку технічних можливостей упровадження горизонтального буріння. Загалом оптимальною для ефективного буріння пласт сланцевих порід вважають товщину від 30 м. Як бачимо на рис. 11, товщини продуктивних горизонтів обраних об'єктів мають достатньо широке коливання, від 12 м (Баккен) до 185 м (Барнетт). Щодо горизонту В-23 (рудівські верстви), то його товщину вважають достатньою для ефективного застосування методів горизонтального буріння.



Рис. 11. Порівняльна блок-діаграма глибини залягання та товщини формацій у США та В-23 у ДДЗ за зведеними даними (Sohail et al., 2022)

Порівняння (Генераційна якість материнських порід). Вміст загального органічного вуглецю в породах є важливим параметром для оцінювання материнських порід, оскільки він відображає кількість органічної речовини. Певною мірою його також використовують для прогнозування окисно-відновних умов розвитку басейну під час седиментації сланцевих порід, оскільки потенціал збереження органічної речовини може бути високим за анаеробних умов осадконакопичення. Оскільки якість і потенціал нетрадиційних покладів зазвичай пов'язані з високими показниками вмісту органічного вуглецю, це має вирішальне значення для оцінювання ресурсів сланцевого газу/нафти. Загалом 78 % нафтових колекторів у щільних породах є морськими відкладами; відповідна органічна речовина материнських порід переважно належить до типу II (48 %), типу II/III (25 %), типу I/II (18 %), типу III (5 %) та типу I (4 %); ТОС зазвичай коливається

від 2 до 5 % ваг., а R_o переважно від 0,9 до 1,1 %. Кероген з часом зазнає впливу дедалі вищих температур, що призводить до збільшення коефіцієнта відбиття вітриніту. Рівень газонасиченості зростає з термічною зрілістю (Zhao et al., 2007). Значення коефіцієнта відбиття вітриніту в діапазоні від 0,6 до 1,1 % відповідають наявності нафти і жирного газу. Рівень відбиття вітриніту від 1,1 до 3,0 % вказує на хороший потенціал для видобутку газу (Huang et al., 2012; Jarvie, 2012). Як показано на рис. 12, загалом Північноамериканські та ДДЗ сланці мало чим відрізняються за значеннями R_o та ТОС. Середній вміст загального органічного вуглецю коливається від 3 % (Ігл-Форд, Барнетт) до 10–12 % (Верхній і Нижній Баккен). Діапазон рівня зрілості дуже неоднорідний, але зазвичай становить 1–3 % R_o . Переважно для цих порід характерний II–III тип керогену.

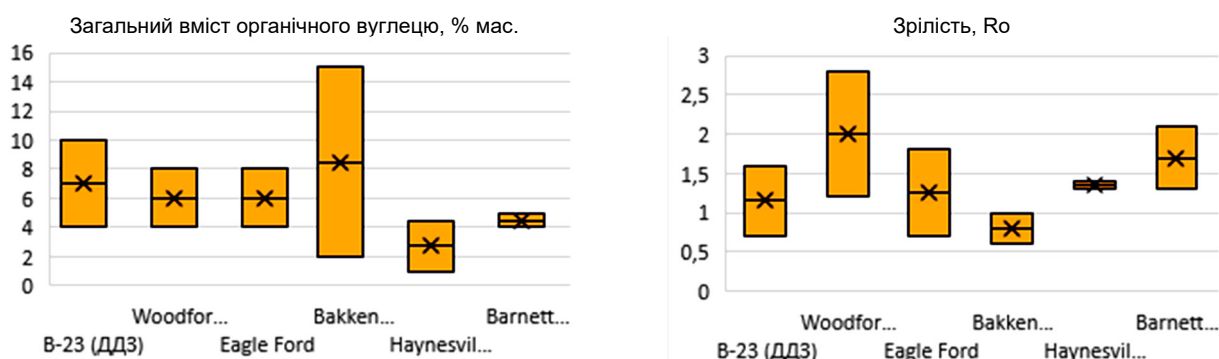


Рис. 12. Порівняльна блок-діаграма зрілості та ТОС у формаціях у США та горизонту В-23 ДДЗ за зведеними даними (Sohail et al., 2022)

Порівняння (Петрофізичні параметри). За результатами петрофізичної інтерпретації ГДС і кернових даних, значення пористості для всіх сланцевих формацій-аналогів перебуває в діапазоні 3–8 %, середні значення пористості для продуктивних сланцевих пластів коливаються в межах 5,6–6,6 % (рис. 13), фільтраційні властивості для більшості об'єктів характеризуються дуже низькою проникністю ($< 0,1$ мД).

Наведений досить широкий діапазон значень загальної пористості найкраще відповідає характеристиці сланцевих формацій Баккен і Хейнсвілл. Високі значення пористості справляють позитивне враження щодо оцінки запасів і вуглеводневого потенціалу сланцевих товщ у межах ДДЗ. У нашому випадку пористість визначали із застосуванням сучасних методів ГДС (ядерно-магнітний

каротаж, ГГК-Щ, елементна спектроскопія), а також із використанням даних аналізу керну (методи XRD, XRF).

У порівняннях петрофізичних характеристик за даними так званих типових методів каротажу (гамма-каротаж, каротаж опору, методи пористості) (рис. 14) простежуються спільні риси поведінки та морфології кривих методів ГДС і спостерігаються доволі схожі відкриті кривих на діаграмах каротажу, що свідчить про подібні характеристики резервуарів. Сланцеві формації лежать на потужних карбонатних товщах, що пояснюється подібними умовами седиментації. У порівнянні мінералогічного складу за даними ГДС теж простежуються подібності в літологічному сенсі.

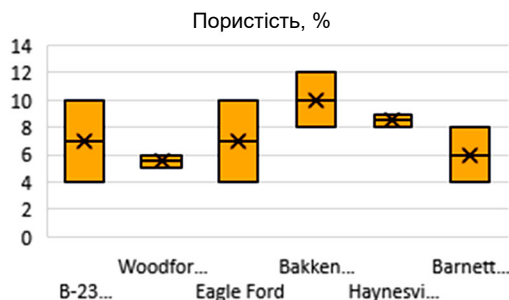


Рис. 13. Порівняльна блок-діаграма пористості у формаціях у США та горизонту В-23 ДДЗ за зведеними даними (Sohail et al., 2022)

Порівняння (Мінералогічний склад). Мінералогічний склад порід має важливе значення для ефективного розроблення колекторів нетрадиційного типу. Традиційно ці породи сформовані з кремнезему, глинистих мінералів, карбонатних мінералів (кальцит, доломіт), піриту та керогену. Залежно від співвідношень цих ключових компонентів породи можна зробити припущення

щодо вуглеводневого потенціалу і якості виконання ГРП для цих товщ. Міжнародний досвід розробки зазначених колекторів продемонстрував, що здійснити якісний багатостадійний ГРП й отримати позитивні економічно обґрунтовані результати можна за вмісту глинистих мінералів у відкладах менше 40 %. Це пов'язано з геомеханічними властивостями порід, а саме низьким показником крихкості (BI) (Jarvie et al., 2007). Зазвичай високий вміст кальциту не дуже позитивно впливає на вуглеводневий потенціал резервуарів материнської породи, оскільки він зменшує пористість, але не робить породу пластичнішою. Кремнезем позитивно впливає як на якість колектора (RQ), так і на механічну якість (MQ) пласта. Пірит і кероген також впливають, але неістотно, оскільки їхній відносний вміст від загального мінералогічного складу нетрадиційного колектора не є вагомим. У комплексі разом з інтерпретацією даних ГДС проводилися дослідження для визначення мінералогічного складу гірських порід за даними ядерного матеріалу, де можемо виділити подібності в літологічному складі. Виявлено, що за даними рентгено-дифракційного аналізу порід горизонт В-23 за мінералогічним складом схожий до сланців Барнет і Вудфорд, а В-24-25 – до Ігл-Форд (рис. 15), що раніше фіксувалося за результатом порівняння літологічних характеристик за ГДС.

Аналізуючи наявні дані та порівнюючи їх зі світовими аналогами, ми можемо зробити попередній висновок щодо значної перспективності візейських нетрадиційних об'єктів ДДЗ – сланців горизонту В-23 і карбонатів горизонтів В-24-25 на вуглеводневий потенціал. Такий порівняльний підхід дає змогу виявити спільні та відмінні риси за ключовими геологічними параметрами, такими як умови осадконакопичення, вміст органічної речовини, генераційні властивості, пористість, мінералогічний склад і термальна зрілість.

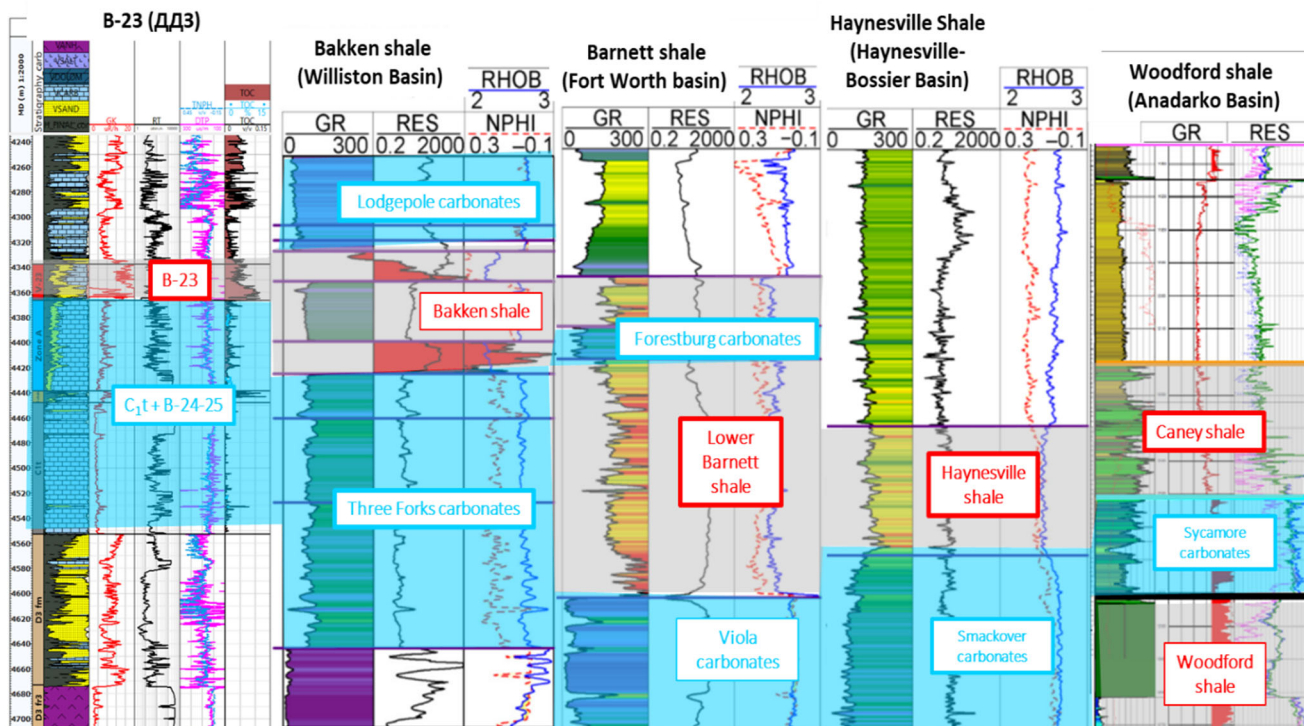


Рис. 14. Схематична кореляція обраних аналогів з досліджуваними візейськими горизонтами ДДЗ на прикладі "типових каротажів" (за даними Smyer et al., 2019)

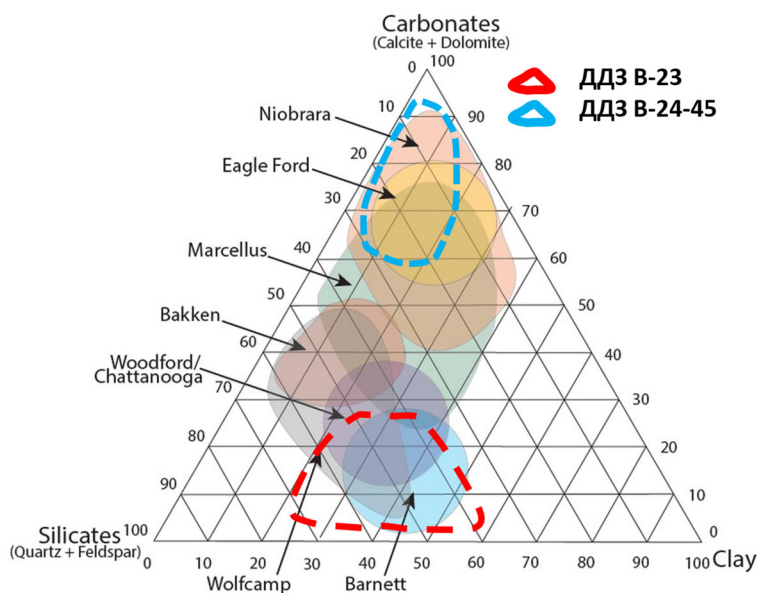


Рис 15. Порівняльна тригонограма вмісту мінералів у нетрадиційних формаціях США та горизонтів В-23, В-24-25 ДДЗ (Mews et al., 2019)

Дискусія і висновки

Порівняння за методом аналогії демонструє подібність у геологічному та геохімічному сенсі горизонту В-23 (кальцитизованих збагачених на органіку аргілітів) з північноамериканськими сланцевими товщами, що підтверджує перспективність розробки зазначеного об'єкта за технологіями розроблення нетрадиційних колекторів (горизонтальне буріння, ГРП, солянокислотне оброблення (СКО) (рис. 16).

Основні продуктивні поклади сланцевого газу та нафти у США мають спільні риси з візейськими нетрадиційними колекторами ДДЗ, серед яких високий вміст загального органічного вуглецю (> 2 %), значна пористість (> 5 %), низький вміст глинистих мінералів (< 40 %) й оптимальна термальна зрілість (0,6–3,0 % коефіцієнта відбиття вітриніту R_o). Глибини залягання та геологічні положення візейських нетрадиційних об'єктів загалом зіставні з північноамериканськими аналогами або дещо вищі за них, зважаючи на наявні дані; товщини відкладів лежать у схожих діапазонах. З позиції мінералогічного складу, а саме за даними рентгено-структурного аналізу (XRD), рудівські верстви схожі до сланців Барнетт і Вудфорд, карбонатні горизонти В-24-25 відповідають формації Ігл-Форд. Однак мінливість геологічних властивостей сланців, що зумовлена різним середовищем / умовами їхнього накопичення та літогенезу, впливає на особливості розробки покладів, визначення потенційно продуктивних ділянок й ефективність видобутку із горизонтальних свердловин. Задля більшої ефективності визначається необхідність подальшого вивчення конкретного горизонту в літофаціальному сенсі. Розуміння мінливості мінерального складу горизонту вздовж південної частини Дніпровсько-Донецької западини наразі має недостатній рівень вивченості. Ураховуючи досвід розроблення північноамериканських об'єктів, літологічний склад порід має одне з найголовніших значень у процесі експлуатації колекторів нетрадиційного типу. Це зумовлено фізико-механічними властивостями порід під час проведення багатостадійного гідророзриву пласта, що дає змогу ефективно вилучати вуглеводні з нафтогазоносних сланцевих горизонтів.

Крім того, особливості залягання горизонту створюють додаткові сприятливі умови для впровадження технологій розробки сланцевих товщ. Як представлено в роботі (Huo et al., 2021), межі розділення між сланцями та вапняковою покрівлею / підшовою є важливими механічними межами розділення порід. Вапняки, що лежать вище і нижче, з меншою кількістю тріщин і вищим тиском гідророзриву можуть діяти як ефективні бар'єрні шари, запобігаючи проникненню індукованих тріщин у сланцевому горизонті в сусідні вапнякові ділянки під час гідравлічного розриву пласта через їхні механічні межі. Цей бар'єр може сприяти створенню високої гідравлічної потужності у сланцевому розрізі та формуванню складної мережі тріщин. Крім того, карбонатні горизонти (В-24-25), що лежать під рудівськими верствами, теж можуть стати перспективним об'єктом для розроблення нетрадиційних колекторів, але його рівень вивченості нині перебуває на початковому етапі. Ураховуючи досвід формації Баккен та Ігл-Форд, можемо припустити, що високоякісні материнські породи горизонту В-23 можуть "підживлювати" карбонатні горизонти В-24-25, що залягають нижче. У роботі (Levonіuk et al., 2023) наведено, що візейські карбонатні горизонти мають достатній генераційний потенціал, щоб самостійно поставати в ролі материнської породи. Розвідка та розробка цих карбонатних колекторів є доволі перспективними, ураховуючи значні відкриття родовищ із подібними колекторами (Jiang et al., 2008). Карбонатні породи можуть слугувати не тільки материнськими (переважно аргілітові карбонатні породи), але й колекторами (зазвичай карбонатні породи з меншою кількістю глинистих мінералів) (Palacas, 1984). Карбонатні породи як материнські породи і колектори були виявлені в багатьох басейнах, як-от басейн Перської затоки, басейни Загрос і Віллістон, басейн Південно-Мексиканської затоки та ін. (Palacas, 1984; Klemme, & Ulmishek, 1991; Liu et al., 2017). Тож, ураховуючи досвід розробки карбонатних горизонтів (зокрема й ущільнених), подальше вивчення візейських карбонатних горизонтів (В-24-25) можна вважати доцільним і перспективним.

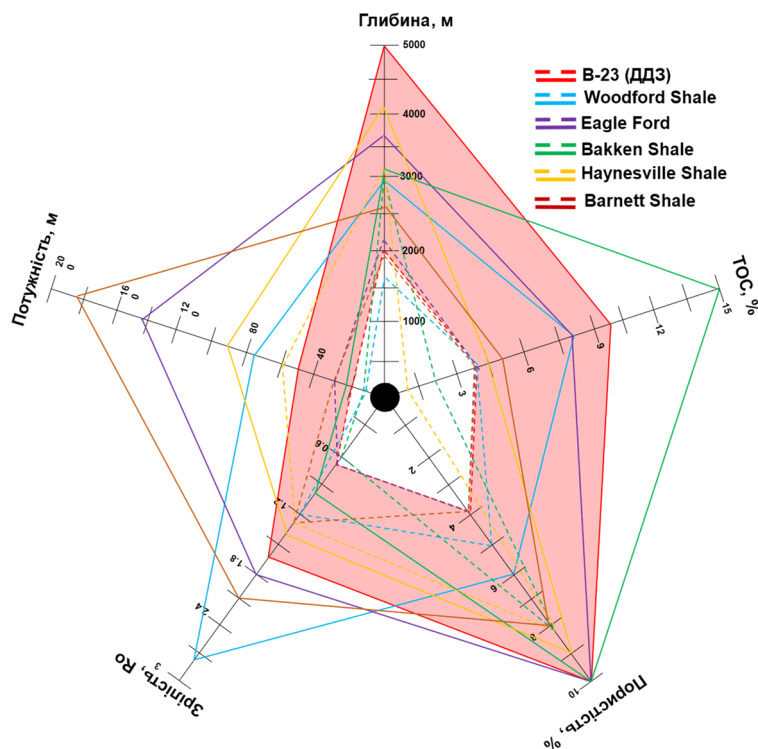


Рис. 16. Порівняльна радіальна діаграма головних геологічних і геохімічних характеристик у формаціях у США та горизонту В-23 (ДДЗ) за зведеними даними (Sohail et al., 2022)

Метод аналогії надав цінну інформацію щодо перспектив освоєння візейських нетрадиційних колекторів у межах ДДЗ (горизонти В-23, В-24-25). Хоча розглянуті Північноамериканські горизонти мають схожі характеристики з обраними для порівняння об'єктами в ДДЗ, дослідження демонструє, що немає "типових" параметрів для визначення рівня успішності розроблення горизонтів щільних або сланцевих порід. Кожна формація має різний мінералогічний склад, петрофізичні та геохімічні характеристики, що зумовлені мінливими геологічними умовами седиментації та літогенезу. З огляду на це визначення стратегій освоєння візейських колекторів нетрадиційного типу має індивідуальний характер. Проте ми можемо зробити такі висновки:

- Основні продуктивні поклади сланцевого газу та нафти у США мають спільні риси з візейськими нетрадиційними колекторами ДДЗ, серед яких високий вміст загального органічного вуглецю ($> 2\%$), значна пористість ($> 5\%$), низький вміст глинистих мінералів ($< 40\%$) й оптимальна термальна зрілість ($R_o = 0,8-1,3\%$ і більше).

- За мінералогічним складом рудівські верстви горизонту В-23 схожі до сланців Барнетт і Вудфорд, карбонатні горизонти В-24-25 відповідають формації Ігл-Форд.

- Породи, що залягають у тісній асоціації з карбонатними відкладами, є найкращими ресурсними системами для сланцевої нафти та газу.

Подальші дослідження візейських горизонтів В-23 та В-24-25 мають зосереджуватись на літофаціальному вивченні, моделюванні процесів седиментації, розширенні знань щодо палеогеографічних умов, а також геомеханічному моделюванні. Детальне літофаціальне моделювання та реконструкція умов седиментації горизонтів візейського віку допоможе виділити першочергові перспективні ділянки для запровадження горизонтального буріння та випробування цих горизонтів. Геомеханічне моделювання з використанням досліджень механічних властивостей порід

дасть змогу оптимізувати технічні операції для успішної розробки цих нетрадиційних колекторів.

Внесок авторів: Богдан Круглов – концептуалізація, написання (оригінальна чернетка); Сергій Левонюк – концептуалізація, написання (перегляд і редагування); Святослав Юрас – написання (перегляд і редагування); Іван Карпенко – написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

- Вертюх, А. М. (2019). *Геологічна будова та перспективи нафтогазоносності нижнього карбону південної припортової зони Дніпровсько-Донецької западини*. [Неопубл. дис. д-ра геол. наук]. Київський національний університет імені Тараса Шевченка.
- Вижва, С. А., Онищук, В. І., Онищук, І. І., Орлюк, М. 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.v4i4.2019.177380>
- Лазарук, Я. (2012). Геологічна будова та нафтогазовий потенціал відкладів хіа мікрофауністичного горизонту Дніпровсько-Донецької западини. *Мінеральні ресурси України*, 2, 17–20.
- Лукин, А. Е. (2011). О природе и перспективах газоносности низкопроницаемых пород осадочной оболочки Земли. *Доповіді НАН України*, 3, 114–123.
- Лукін, О., Гафич, І., Гончаров, Г., Макогон, В., & Пригаріна, Т. (2020). Вуглеводневий потенціал надр України та головні напрями його освоєння. *Мінеральні ресурси України*, 4, 28–38. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.28-38>
- Макогон, В. В. (2008). Фаціальні типи та зональність візейських нафтогазоносних відкладів центральної частини ДДЗ. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 1, 96–103. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2008.152442>
- Мачуліна, С. О., & Бабко, І. М. (2004). До геології візейської доманікоїдної товщі Дніпровсько-Донецької западини. *Нафтова і газова промисловість*, 5, 3–8.
- Михайлов, В. А., Вакарчук, С. Г., Зейкан, О. Ю., Касянчук, С. В., Куровець, І. М., Вижва, С. А., Загнітко, В. М., Коваль, А. М., Крупський, Ю. З., Гладун, В. В., Чепіль, П. М., Стрижак, В. П., & Кульчицька, Г. О. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України*. Ніка-Центр.
- Огар, В. В. (2012). Візейські кременісті породи США та України: поширення, генезис та нафтогазоносність. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 5, 143–151. <http://dx.doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2012.150039>
- Старостенко, В., Пашкевич, І., Макаренко, І., Купрієнко, П. Я., & Савченко, О. С. (2017). Неоднородність литосфери Дніпровсько-

Донецкой впадины и ее геодинамические следствия. Ч. I. Геодинамическая интерпретация. *Геодинамика*, 1(22), 125–138. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125>

Abousleiman, Y., Tran, M., Hoang, S., Bobko, C., Ortega, A., & Ulm, F. J. (2008). Study characterizes Woodford shale. *Am Oil Gas Rep.*, 51(1), 106–115.

Bowker, K. A., (2007). Development of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin. *American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery*, article 10126. Tulsa, Oklahoma.

Bromhead, A., & Butt, T. (2019). Regional appraisal of shale resource potential within the Permian, Anadarko and Arkoma basins: how does the Alpine High stack up? *First Break*, 37(4), 43–47. <https://doi.org/10.15530/URTEC-2018-2886116>

Bruner, K. R., & Smosna, R. A. (2011). A comparative study of the Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, and Devonian Marcellus shale, Appalachian basin. US department of energy.

Burruss, R. C., & Hatch, J. R. (1989). *Geochemistry of oils and hydrocarbon source rocks, greater Anadarko basin: evidence for multiple sources of oils and long-distance oil migration*. Oklahoma Geological Survey.

De Silva, P. N. K., Simons, S. J. R., Stevens, P., & Philip, L. M. (2015). A comparison of North American shale plays with emerging non-marine shale plays in Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.04.011>

Eker, I., Kurtoglu, B., & Kazemi, H. (2014). Multiphase rate transient analysis in unconventional reservoirs: theory and applications. In SPE/CSUR Unconventional Resources Conference–Canada. OnePetro. <https://doi.org/10.2118/171657-PA>

Energy Information Administration (EIA). (2019). *Dry shale gas estimates by play*. <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php#production>

Eoff, D. J. (2013). Shale hydrocarbon reservoirs: Some influences of tectonics and paleogeography during deposition. *Geology of the Haynesville Gas Shale in East Texas and West Louisiana*, 105, 5–27.

Gavriush, V. K., Machulina, S. A., & Kurilenko, V. S. (1994). Visean oil-source formation of the Dnieper-Donets basin. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 7, 92–95.

Goldhammer, R. K. (1998). Second-order accommodation cycles and points of stratigraphic turnaround: Implications for high-resolution sequence stratigraphy and facies architecture of the haynesville and cotton valley lime pinnacle reefs of the east texas salt basin. *Houston Geological Society Bulletin North American Explorationists Meeting*, 27, 1–2.

Hackley, P. C., & Cardott, B. J. (2016). Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: *International Journal of Coal Geology*, 163, 8–51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010>

Hammes, U., & Frébourg, G. (2012). Haynesville and Bossier mudrocks: A facies and sequence stratigraphic investigation, East Texas and Louisiana, USA. *Marine and Petroleum Geology*, 31(1), 8–26. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.10.001>

Hammes, U., Hamlin, H. S., & Ewing, T. E. (2011). Geologic analysis of the Upper Jurassic Haynesville Shale in east Texas and west Louisiana. *AAPG bulletin*, 95(10), 1643–1666. <http://dx.doi.org/10.1306/02141110128>

Hentz, T. F., & Ruppel, S. C. (2010). Regional Lithostratigraphy of the Eagle Ford Shale: Maverick Basin to East Texas Basin. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 60, 325–337.

Huang, J., Caineng, Z., Jianzhong, L., Dazhong, D., Sheiao, W., Shiqian, W., & Cheng, K. (2012). Shale gas generation and potential of the lower Cambrian Qiongzhusi formation in the southern Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(1), 75–81. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60017-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60017-2)

Huo, Z., Gao, J., Zhang, J., Zhang, D., & Liang, Y. (2021). Role of overlying and underlying limestones in the natural hydraulic fracturing of shale sections: The case of marine-continental transitional facies in the Southern North China Basin. *Energy Reports*, 7, 8711–8729. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.025>

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

Iuras, S., Orlyuk, M., Karpyn, V., Levoniuk, S. (2024). Unconventional Reservoir Formation Evaluation of Visean organic rich formation with limited logging dataset in Dniro-Donets Basin, Eastern Ukraine. *GeoConvention, Cargary, June, 17–19, 2024*.

Jarvie, D. M. (2012). Shale resource systems for oil and gas. Part 2. Shale-oil resource systems. <https://doi.org/10.1306/13321446M973489>

Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., & Pollastro, R. M. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG bulletin*, 91(4), 475–499. <https://doi.org/10.1306/121906060608>

Jiang, H. Y., Song, X. M., Wang, Y. J., An, X. X., Qi, R. L., & Peng, S. M. (2008). Current situation and forecast of the world's carbonate oil and gas exploration and development. *Offshore Oil*, 28(4), 6–13.

Kabyshv, B., Krivchenkov, B., Stovba, S., & Ziegler, P. A. (1998). Hydrocarbon habitat of the Dniepre-Donets depression. *Marine and Petroleum Geology*, 15, 177–190. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00018-X)

Karpenko, I. (2016). Macerals of Devonian and Carboniferous Petroleum Source Rocks within Southern Border of Dniepre-Donets Basin, Ukraine. *5th National Conference-School: Modern Problems of Geological Sciences 2016, Kyiv, Ukraine* (p. 32–34).

Karpenko, O., Ohar, V., Karpenko, I., & Bezrodna, I. (2021). Differentiation of Rudov Beds based on the statistical methods on geological and

geophysical data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/005>

Klemme, H. D., & Ulmishek, G. F. (1991). Effective Petroleum Source Rocks of the World: Stratigraphic Distribution and Controlling Depositional Factors. *AAPG Bulletin*, 75, 1809–1851. <https://doi.org/10.1306/0C9B2A47-1710-11D7-8645000102C1865D>

Klemme, H. D. (1994). *Petroleum Systems of the World Involving Upper Jurassic Source Rocks: Chapter 3: Part I. Introduction* (p. 51–72). AAPG Special Volumes.

Kruhlov, B., Levoniuk, S., Iuras, S., & Karpenko, I. (2023). A Review of Ukrainian Visean Shales "Rudov Beds" for Shale Gas Exploration and Comparison to North American Shale Plays. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2023(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520146>

Kuang, L., Yong, T., Dewen, L., Chang, Q., Ouyang, M., Lianhua, H., & Deguang, L. I. U. (2012). Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6), 700–711. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60095-0](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60095-0)

Levoniuk, S., Iuras, S., Csizmeg, J., Vertiukh, A., Karpyn, V., Verhunencko, O., Khrapach, T., Kruhlov, B., Karpenko, I., & Sralla, B. (2023). Geological Settings and Depositional Model of Visean Unconventional Plays Within Dniro-Donets Basin. *AAPG 2023 International Conference and Exhibition (ICE)*. https://www.researchgate.net/publication/376582311_Geological_Settings_and_Depositional_Model_of_Visean_Unconventional_Plays_within_Dniro-Donets_Basin

Levoniuk, S., Csizmeg, J., Orynychak, S., Ostafiuchuk, A., Verhunencko, O., Karpyn, V., Vertiukh, A., Khrapach, T., Iuras, S., Kruhlov, B., & Sralla, B. (2024). Visean Unconventional Plays at Dnieper-Donets Basin, Ukraine: Geological Settings and Exploration Challenges. *AAPG 2024 Europe Regional Conference (ERC)*.

Li, Y., Zhou, D. H., Wang, W. H., Jiang, T. X., & Xue, Z. J. (2020). Development of unconventional gas and technologies adopted in China. *Energy Geoscience*, 1(1–2), 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.04.004>

Liang, D. G., Ran, L. H., & Dai, D. S. et al. (2011). A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin. *Acta Pet Sin.* 32(1), 8–17 [in Chinese].

Liu, W. et al. (2017). New knowledge of hydrocarbon generating theory of organic matter in Chinese marine carbonates. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1), 159–169. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30020-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30020-4)

Mews, K. S., Alhubail, M. M., & Barati, R. G. (2019). A review of brittleness index correlations for unconventional tight and ultra-tight reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070319>

Misch, D., Gross, D., Mahlstedt, N., Makogon, V., & Sachsenhofer, R. (2016). Shale Gas/shale oil potential of Upper Visean Black Shales in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine). *Marine and Petroleum Geology*, 75, 203–219. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.04.017>

Misch, D., Wegerer, E., Gross, D., Sachsenhofer, R. F., Rachetti, A., & Gratzner, R. (2018). Mineralogy and facies variations of Devonian and Carboniferous shales in the Ukrainian Dniepr-Donets Basin. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 111(1), 15–25. <https://doi.org/10.17738/ajes.2018.0002>

Nordeng, S. H., & Helms, L. D. (2010). Bakken source system – Three Forks Formation assessment. *North Dakota Department of Mineral Resources*, 22.

Palacas, J. G. (1984). *Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks*. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/St18443>

Pollastro, R. M., Jarvie, D. M., Hill, R. J., & Adams, C. W. (2007). Geologic framework of the Mississippian Barnett shale, Barnett-paleozoic total petroleum system, Bend arch-Fort Worth basin, Texas. *AAPG bulletin*, 91(4), 405–436. <https://doi.org/10.1306/103006060608>

Sachsenhofer, R. F., & Koltun, Y. V. (2012). Black shales in Ukraine. A review. *Marine and Petroleum Geology*, 31(1), 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.016>

Sachsenhofer, R. F., Shymanovskyy, V. A., Bechtel, A., Gratzner, R., Horsfield, B., & Reischenbacher, D. (2010). Paleozoic Source Rocks in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine). *Petroleum Geoscience*, 16, 377–399. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-032>

Smyer, K. M., Hamlin, H. S., Eastwood, R., & McDaid, G. (2019). Variability of geologic properties of shale gas and tight oil plays. *Gulf Coast Association of Geological Societies*, 8, 191–209.

Sohail, G. M., Radwan, A. E., & Mahmoud, M. (2022). A review of Pakistani shales for shale gas exploration and comparison to North American shale plays. *Energy Reports*, 8, 6423–6442. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.074>

Sonnenberg, S. A. (2017). Sequence stratigraphy of the Bakken and three forks formations, Williston Basin, USA. <https://doi.org/10.5724/gcs.17.121>

Stephenson, R. A., Yegorova, T., Brunet, M.-F., Stovba, S., Wilson, M., Starostenko, V., Saintot, A., Kusznir, N. (2006). Late Paleozoic intra- and pericratonic basins on the East European Craton and its margins. D. G. Gee, R. A. Stephenson (Eds.), *European Lithosphere Dynamics*, Geological Society of London, 32, 463–479. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2006.032.01.29>

Sun, X., Zhang, T., Sun, Y., Milliken, K. L., & Sun, D. (2016). Geochemical evidence of organic matter source input and depositional environments in the lower and upper Eagle Ford Formation, south Texas. *Organic Geochemistry*, 98, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.05.018>

Zhao, M., Zhang, S., Zhao, L., & Da, J. (2007). Geochemical features and genesis of the natural gas and bitumen in paleo-oil reservoirs of Nanpanjiang Basin, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50, 689–701. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0018-8>

References

- Abousleiman, Y., Tran, M., Hoang, S., Bobko, C., Ortega, A., & Ulm, F. J. (2008). Study characterizes Woodford shale. *Am Oil Gas Rep.*, 51(1), 106–115.
- Bowker, K. A., (2007). Development of the Barnett Shale play, Fort Worth Basin. *American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery*, article 10126. Tulsa, Oklahoma.
- Bromhead, A., & Butt, T. (2019). Regional appraisal of shale resource potential within the Permian, Anadarko and Arkoma basins: how does the Alpine High stack up? *First Break*, 37(4), 43–47. <https://doi.org/10.15530/URTEC-2018-2886116>
- Brunner, K. R., & Smosna, R. A. (2011). A comparative study of the Mississippian Barnett shale, Fort Worth basin, and Devonian Marcellus shale, Appalachian basin. US department of energy.
- Burruss, R. C., & Hatch, J. R. (1989). *Geochemistry of oils and hydrocarbon source rocks, greater Anadarko basin: evidence for multiple sources of oils and long-distance oil migration*. Oklahoma Geological Survey.
- De Silva, P. N. K., Simons, S. J. R., Stevens, P., & Philip, L. M. (2015). A comparison of North American shale plays with emerging non-marine shale plays in Australia. *Marine and Petroleum Geology*, 67, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.04.011>
- Eker, I., Kurtoglu, B., & Kazemi, H. (2014). Multiphase rate transient analysis in unconventional reservoirs: theory and applications. In *SPE/CSUR Unconventional Resources Conference-Canada*. OnePetro. <https://doi.org/10.2118/171657-PA>
- Energy Information Administration (EIA) (2019). *Dry shale gas estimates by play*. <https://www.eia.gov/naturalgas/data.php#production>
- Eoff, D. J. (2013). Shale hydrocarbon reservoirs: Some influences of tectonics and paleogeography during deposition. *Geology of the Haynesville Gas Shale in East Texas and West Louisiana*, 105, 5–27.
- Gavrilish, V. K., Machulina, S. A., & Kurilenko, V. S. (1994). Visean oil-source formation of the Dnieper-Donets basin. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 7, 92–95.
- Goldhammer, R. K. (1998). Second-order accommodation cycles and points of stratigraphic turnaround: Implications for high-resolution sequence stratigraphy and facies architecture of the haynesville and cotton valley lime pinnacle reefs of the east texas salt basin. *Houston Geological Society Bulletin North American Explorationists Meeting*, 27, 1–2.
- Hackley, P. C., & Cardott, B. J. (2016). Application of organic petrography in North American shale petroleum systems: A review. *International Journal of Coal Geology*, 163, 8–51. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.06.010>
- Hammes, U., & Frébourg, G. (2012). Haynesville and Bossier mudrocks: A facies and sequence stratigraphic investigation, East Texas and Louisiana, USA. *Marine and Petroleum Geology*, 31(1), 8–26. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.10.001>
- Hammes, U., Hamlin, H. S., & Ewing, T. E. (2011). Geologic analysis of the Upper Jurassic Haynesville Shale in east Texas and west Louisiana. *AAPG bulletin*, 95(10), 1643–1666. <http://dx.doi.org/10.1306/021411101028>
- Hentz, T. F., & Ruppel, S. C. (2010). Regional Lithostratigraphy of the Eagle Ford Shale: Maverick Basin to East Texas Basin. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 60, 325–337.
- Huang, J., Caineng, Z., Jianzhong, L., Dazhong, D., Shelia, W., Shiqian, W., & Cheng, K. (2012). Shale gas generation and potential of the lower Cambrian Qiongzhusi formation in the southern Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(1), 75–81. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60017-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60017-2)
- Huo, Z., Gao, J., Zhang, J., Zhang, D., & Liang, Y. (2021). Role of overlying and underlying limestones in the natural hydraulic fracturing of shale sections: The case of marine-continental transitional facies in the Southern North China Basin. *Energy Reports*, 7, 8711–8729. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.11.025>
- Iuras, S., Orlyuk, M., Levoniuk, S., Drukarenko V., & Kruhlov, B. (2023). Unconventional shale gas potential of lower visean organic-rich formations of Glynsko-Solohivskiy petroleum region. *Geodynamics*, 34(1), 80–96. <https://doi.org/10.23939/jgd2023.01.080>
- Iuras, S., Orlyuk, M., Karpyn, V., Levoniuk, S. (2024). Unconventional Reservoir Formation Evaluation of Visean organic rich formation with limited logging dataset in Dniepr-Donets Basin, Eastern Ukraine. *GeoConvention, Cargary, June, 17–19, 2024*.
- Jarvie, D. M. (2012). *Shale resource systems for oil and gas. Part 2: Shale-oil resource systems*. <https://doi.org/10.1306/13321446M973489>
- Jarvie, D. M., Hill, R. J., Ruble, T. E., & Pollastro, R. M. (2007). Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG bulletin*, 91(4), 475–499. <https://doi.org/10.1306/121906060608>
- Jiang, H. Y., Song, X. M., Wang, Y. J., An, X. X., Qi, R. L., & Peng, S. M. (2008). Current situation and forecast of the world's carbonate oil and gas exploration and development. *Offshore Oil*, 28(4), 6–13.
- Kabyshv, B., Krivchenkov, B., Stovba, S., & Ziegler, P. A. (1998). Hydrocarbon habitat of the Dniepr-Donets depression. *Marine and Petroleum Geology*, 15, 177–190. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00018-X](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00018-X)
- Karpenko, I. (2016). Macerals of Devonian and Carboniferous Petro-leum Source Rocks within Southern Border of Dniepr-Donets Basin, Ukraine. *5th National Conference-School: Modern Problems of Geological Sciences 2016, Kyiv, Ukraine* (pp. 32–34).
- Karpenko, O., Ohar, V., Karpenko, I., & Bezrodna, I. (2021). Differentiation of Rudov Beds based on the statistical methods on geological and geophysical data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 5–10. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/005>
- Klemme, H. D. & Ulmishek, G. F. (1991). Effective Petroleum Source Rocks of the World: Stratigraphic Distribution and Controlling Depositional Factors. *AAPG Bulletin*, 75, 1809–1851. <https://doi.org/10.1306/0C9B2A47-1710-11D7-8645000102C1865D>
- Klemme, H. D. (1994). *Petroleum Systems of the World Involving Upper Jurassic Source Rocks: Chapter 3: Part 1. Introduction*. AAPG Special Volumes, 51–72.
- Kruhlov, B., Levoniuk, S., Iuras, S., & Karpenko, I. (2023). A Review of Ukrainian Visean Shales "Rudov Beds" for Shale Gas Exploration and Comparison to North American Shale Plays. *17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2023(1), 1–5. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520146>
- Kuang, L., Yong, T., Dewen, L., Chang, Q., Ouyang, M., Lianhua, H., & Deguang, L. I. U. (2012). Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6), 700–711. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(12\)60095-0](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(12)60095-0)
- Lazaruk, Y. (2012). Geological structure and oil and gas potential of deposits of the xiii microfaunal horizon of the Dniepr-Donetsk Depression. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 17–20 [in Ukrainian].
- Levoniuk, S., Iuras, S., Csizmeg, J., Vertiukh, A., Karpyn, V., Verhunencko, O., Khrapach, T., Kruhlov, B., Karpenko, I., & Sralla, B. (2023). Geological Settings and Depositional Model of Visean Unconventional Plays Within Dniepr-Donets Basin. *AAPG 2023 International Conference and Exhibition (ICE)*. https://www.researchgate.net/publication/376582311_Geological_Settings_and_Depositional_Model_of_Visean_Unconventional_Plays_within_Dniepr-Donets_Basin
- Levoniuk, S., Csizmeg, J., Orynychak, S., Ostafichuk, A., Verhunencko, O., Karpyn, V., Vertiukh, A., Khrapach, T., Iuras, S., Kruhlov, B., & Sralla, B. (2024). Visean Unconventional Plays at Dniepr-Donets Basin, Ukraine: Geological Settings and Exploration Challenges. *AAPG 2024 Europe Regional Conference (ERC)*.
- Li, Y., Zhou, D. H., Wang, W. H., Jiang, T. X., & Xue, Z. J. (2020). Development of unconventional gas and technologies adopted in China. *Energy Geoscience*, 1(1–2), 55–68. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.04.004>
- Liang, D. G., Ran, L. H., & Dai, D. S., et al. (2011). A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin. *Acta Pet Sin.* 32(1), 8–17 [in Chinese].
- Liu, W. et al. (2017). New knowledge of hydrocarbon generating theory of organic matter in Chinese marine carbonates. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1), 159–169. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30020-4](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30020-4)
- Loucks, R. G., & Ruppel, S. C. (2007). Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin Texas. *AAPG bulletin*, 91(4), 579–601. <https://doi.org/10.1306/110206060509>
- Lukin, A. E. (2011). On the nature and prospects of gas content of low-permeable rocks of the Earth's sedimentary shell. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 114–123 [in Russian].
- Lukin, O., Gafych, I., Goncharov, G., Makogon, V., Prygarina, T. (2020). Hydrocarbon potential in entrails of the earth of Ukraine and main trend of its development. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 28–38 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31996/mru.2020.4.28-38>
- Machulina, S. O. & Babko, I. M. (2004). On the geology of the Visean pre-Nicolithic strata of the Dniepr-Donetsk Depression. *Oil and Gas Industry*, 5, 3–8 [in Ukrainian].
- Makogon, V. V. (2008). Facies types and zonation of the Visean oil and gas bearing deposits of the central part of the DDB. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine*, 1, 96–103 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2008.152442>
- Mews, K. S., Alhubail, M. M., & Barati, R. G. (2019). A review of brittleness index correlations for unconventional tight and ultra-tight reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319. <https://doi.org/10.3390/geosciences9070319>
- Mikhailov, V. A., Vakarchuk, S. G., Zeikan, O. Y., Kasyanchuk, S. V., Kurovets, I. M., Vyzhva, S. A., Zagnitko, V. M., Koval, A. M., Krupskiy, Yu. Z., Gladun V. V., Chepil', P. M., Stryzhak V. P., & Kulchyska, H. O. (2014). *Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine*. Nika-Center [in Ukrainian].
- Misch, D., Gross, D., Mahlstedt, N., Makogon, V., & Sachsenhofer, R. (2016). Shale Gas/shale oil potential of Upper Visean Black Shales in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine). *Marine and Petroleum Geology*, 75, 203–219. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2016.04.017>
- Misch, D., Wegerer, E., Gross, D., Sachsenhofer, R. F., Rachetti, A., & Gratzner, R. (2018). Mineralogy and facies variations of Devonian and Carboniferous shales in the Ukrainian Dniepr-Donets Basin. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 111(1), 15–25. <https://doi.org/10.17738/ajes.2018.0002>
- Nordeng, S. H., & Helms, L. D. (2010). Bakken source system – Three Forks Formation assessment. *North Dakota Department of Mineral Resources*, 22.
- Ogar, V. V. (2012). The Visean siliceous rocks of the USA and Ukraine: distribution, genesis and oil and gas content. *Collection of scientific works of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of*

Ukraine, 5, 143–151 [in Ukrainian]. <http://dx.doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2012.150039>

Palacas, J. G. (1984). *Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks*. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/St18443>

Pollastro, R. M., Jarvie, D. M., Hill, R. J., & Adams, C. W. (2007). Geologic framework of the Mississippian Barnett shale, Barnett-paleozoic total petroleum system, Bend arch–Fort Worth basin, Texas. *AAPG bulletin*, 91(4), 405–436. <https://doi.org/10.1306/10300606008>

Sachsenhofer, R. F., & Koltun, Y. V. (2012). Black shales in Ukraine. *Marine and Petroleum Geology*, 31(1), 125–136. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.016>

Sachsenhofer, R. F., Shymanovskyy, V. A., Bechtel, A., Gratzner, R., Horsfield, B., & Reischenbacher, D. (2010). Paleozoic Source Rocks in the Dniepr-Donets Basin (Ukraine). *Petroleum Geoscience*, 16, 377–399. <https://doi.org/10.1144/1354-079309-032>

Smyer, K. M., Hamlin, H. S., Eastwood, R., & McDaid, G. (2019). Variability of geologic properties of shale gas and tight oil plays. *Gulf Coast Association of Geological Societies*, 8, 191–209.

Sohail, G. M., Radwan, A. E., & Mahmoud, M. (2022). A review of Pakistani shales for shale gas exploration and comparison to North American shale plays. *Energy Reports*, 8, 6423–6442. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.04.074>

Sonnenberg, S. A. (2017). *Sequence stratigraphy of the Bakken and three forks formations*. Williston Basin, USA. <https://doi.org/10.5724/gcs.17.121>

Starostenko, V., Pashkevych, I., Makarenko, I., Kuprienko, P. Y., & Savchenko, O. S. (2017). Lithospheric heterogeneity of the Dnipro-Donetsk Basin and its geodynamic implications. Ch. 1. *Geodynamic Interpretation*. *Geodynamics*, 1(22), 125–138 [in Russian]. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.01.125>

Stephenson, R. A., Yegorova, T., Brunet, M.-F., Stovba, S., Wilson, M., Starostenko, V., Saintot, A., Kuszniir, N. (2006). Late Paleozoic intra- and pericratonic basins on the East European Craton and its margins. D. G. Gee, R. A. Stephenson (Eds.), *European Lithosphere Dynamics*, *Geological Society of London*, 32, 463–479. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2006.032.01.29>

Sun, X., Zhang, T., Sun, Y., Milliken, K. L., & Sun, D. (2016). Geochemical evidence of organic matter source input and depositional environments in the lower and upper Eagle Ford Formation, south Texas. *Organic Geochemistry*, 98, 66–81. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2016.05.018>

Vertyukh, A. M. (2019). Geological structure and prospects of oil and gas bearing capacity of the Lower Carboniferous of the southern coastal zone of the Dnipro-Donetsk Basin. [Unpublished doctoral dissertation]. Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian].

Vyzhva, S. A., Onyshchuk, V. I., Onyshchuk, I. I., Orliuk, M. I., Drukarenko, V. V., Reva, M. V., & Shabatura, O. V. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean Stage of the Lohvytsia zone of the Dnipro-Donetsk Basin. *Geophysical Journal*, 41(4), 145–160 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177380>

Zhao, M., Zhang, S., Zhao, L., & Da, J. (2007). Geochemical features and genesis of the natural gas and bitumen in paleo-oil reservoirs of Nanpanjiang Basin, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50, 689–701. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0018-8>

Отримано редакцією журналу / Received: 25.03.24

Прорецензовано / Revised: 01.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Bohdan KRUHLOV¹, Master's Student

ORCID ID: 0000-0002-7899-2957

e-mail: bkr12@ukr.net

Serhii LEVONIUK², PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-4073-8152

e-mail: serhii.levoniuk@ugv.com.ua

Sviatoslav IURAS³, PhD Student

ORCID ID: 0009-0004-4715-2914

e-mail: svyuras@gmail.com

Ivan KARPENKO^{4,5}, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0001-7753-9010

e-mail: karpenko.i.geoscience@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

²JSC Ukrgezvydobuvannya, UkrNDIGas, Kyiv, Ukraine

³Institute of Geophysics NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

⁴JSC Ukrgezvydobuvannya, Kyiv, Ukraine;

⁵M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine

REVIEW OF VISEAN UNCONVENTIONAL RESERVOIRS WITHIN DNIPRO-DONETS DEPRESSION AND COMPARISON TO NORTH AMERICAN UNCONVENTIONAL FORMATIONS

Background. Modern advances in the extraction of hydrocarbons from shale and tight formations, namely improved horizontal drilling technologies and multi-stage hydraulic fracturing at economically viable costs, are opening up new horizons for oil and gas exploration and development around the world. The importance of shale oil and gas has sparked interest around the world following the great success of production in North America. This article is a continuation of a series of publications on the study of Visean unconventional reservoirs within Dnipro-Donets Depression. In this paper, the Visean sediments, namely the Lower Visean carbonate plate of the XIII MFH (horizons V-24-25), and the "Rudov Beds", siliceous calcified organic-rich shales (V-23) within the identified prospective zones of the Dnipro-Donets Basin (DDB), are considered for their unconventional reservoir development potential using the method of analogy with successful North American formations.

Methods. Key geological and geochemical parameters were compared with the selected analogues, namely, geological age, sedimentation conditions, lithology and sediment thickness, geochemical data (total organic carbon (TOC), vitrinite reflectance (Ro), rock generation properties according to pyrolytic studies and rock maturity), mineralogical composition and porosity.

Results. According to this study, the Visean unconventional deposits within DDB clearly correlate with the most productive gas fields from unconventional reservoirs (shales, organic-rich carbonates) in North America. The depth and geological position of the Visean unconventional targets are generally comparable to or slightly higher than their North American counterparts based on available data; sediment thicknesses are in similar ranges. In terms of mineralogical composition, namely X-ray diffraction (XRD) analysis, the ore beds are similar to the Barnett and Woodford shales, and the V-24-25 carbonate horizons correspond to the Eagle Ford Formation. The high average TOC content of the V-23 horizon (up to 10% by weight) is comparable to the Bakken and Woodford shales.

Conclusions. The geological and geochemical parameters of the Visean horizons considered in this paper are promising in terms of the prospects for the development of unconventional reservoirs to increase Ukraine's energy resource base. However, in order to draw conclusions about the economic profitability of the development of the studied objects, a more detailed study is required, taking into account the results of drilling and testing after multistage hydraulic fracturing.

Keywords: source rock, unconventional reservoirs, total organic carbon, shale gas, rudov beds, thermal maturity.

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

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

UDC 550.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.05>

Natalia RUSACHENKO, PhD Student (Geol.)

ORCID ID: 0000-0002-7407-696X

e-mail: rusachenko_natasha@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Tetiana PASTUSHENKO, PhD (Philol.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-9826-5004

e-mail: t.pastushenko@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Serhii VYZHVA, DSc (Geol.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-4091-6649

e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

SALT-DOME STRUCTURES MODELING IN DEPTH DOMAIN USING RAY TRACING AND SEISMIC ATTRIBUTE ANALYSIS

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

Background. Increasing the resource base and hydrocarbon exploration is the main goal of performing seismic data acquisition. Due to the presence of salt diapirs, normal and reverse faults as well as other discontinuities in the geological subsurface, there appear characteristic features of seismic signals – a break in phase continuity and significant attenuation of the amplitude without a break in phase continuity. These geological features are sometimes distinguished by attenuation of the seismic signal or even an absence of wave field reflections. In areas of salt-dome tectonics, it is often completely impossible to trace any reflective horizons. To accurately map the fault location, deep or vertical horizons, it is necessary to improve the approach to obtaining and interpreting data in faulted areas with complex geology.

Methods. The research presents an integrated approach to modeling the rays from each receiver of seismic signals to each bin on the reflective boundary. The reflected beams then propagate from the reflective boundary to the simulated position of the seismic receiver. Since the nature and velocity of beam propagation vary, it is possible to obtain additional information from zones shielded by faults or sub-vertical horizons, to trace the trajectories of seismic energy propagation and its focusing/defocusing zones. Verification of the seismic image and its geological content was performed using seismic attribute analysis.

Results. Ray tracing allowed analyzing poor illumination zones below salt wings. During further steps such as processing and interpretation, ray tracing provided additional information for diapir mapping. Seismic attribute analysis was used as an additional tool to define the boundaries of the salt structure. This makes it possible to analyze the dynamic and kinematic parameters of the seismic field and map the salt body's boundaries based on these characteristics.

Conclusions. An integrated approach involving several methods will solve the problem of mapping seismic horizons in areas surrounding fault zones with a weak seismic signal. A more reliable geological image can only be obtained by using complex sequences, including seismic processing, ray tracing, and seismic attribute analysis. The integrated application of the techniques demonstrates consistent geological results and has implications for discovering new deposits and hydrocarbon traps confined to the zones of development of salt-dome tectonics in the Dnipro-Donets basin.

Keywords: ray tracing, seismic data processing, seismic attribute analysis, interpretation, salt tectonics, diapir, hydrocarbons, oil, gas.

Background

The Dnipro-Donets Basin (DDB) is a large oil and gas-bearing province of Ukraine with extensive deposits of oil and gas, rock and potassium salt, sulfur, mercury, polymetals, mineral water sources, which has led to a wide variety of geological and geophysical studies undertaken here over the years, contributing to the region's high level of exploration.

Despite the use of modern processing algorithms, previous studies did not prove sufficient to accurately reproduce the geological environment in areas with prospects for hydrocarbon deposits, although, at the same time, complicated by salt diapirism. Therefore, it is important to develop an integrated approach to modeling seismicological characteristics and methods for the seismic wave field analysis in a geological section complicated by salt-dome tectonics.

To test the effectiveness of the technology of seismic research on salt diapirs and their adjacent zones, the authors selected a number of objects within the gas condensate field in the Mashivsko-Shebelinskiy gas-bearing district of the Eastern oil and gas-bearing region of Ukraine, located in the central part of the periaxial zone of the Dnipro-Donets basin.

The geological structure of the research area was studied using drilling and seismic data. The shield is covered by Paleozoic, Mesozoic, and Cenozoic sedimentary formations.

The oldest formations to make the sedimentary complex of the studied area are the Devonian sediments, which lie on a weathered shield transgressively with angular and stratigraphic discordance. Devonian deposits are composed of terrigenous and halogenated formations. Sandstones, limestones, siltstones, and mudstones represent terrigenous formations above the salt. In terms of age, the overlying Devonian stratum is an unsegmented complex of Upper Famennian sediments. Below the terrigenous Devonian formations, lies a saline stratum represented by salt with interlayers of anhydrites, dolomites, and terrigenous rocks. With a sufficient thickness, the salt layer creates salt domes rising up to the bottom of the Paleogene.

The morphology of pre-Triassic salt domes is either mushroom-shaped or columnar, which is determined by the presence or absence of the Lower Permian sulfate-halogen deposits in their section. In the areas of the Dnieper-Donets depression with widely-developed sulfate-halogen deposits, salt diapirs will exhibit a mushroom-like shape. Salt domes mainly complicate adjacent Paleozoic anticlinal folds; and in the Mesozoic stratum, they are responsible for the formation of folds that cover the buried Paleozoic uplifts.

The Upper Serpukhovian deposits consist of rhythmic layers of sandstones, siltstones, mudstones, and occasional limestones. Sandstones are light-gray, gray, layered, in some places turning into gray, thin-layered siltstones.

Sandstones have good filtration and permeability properties and are usually considered as hydrocarbon reservoirs.

In such cases, the overhanging Lower Permian salt wings can make the most effective shield. An example of such an object is shown in Fig. 1a, which shows a cross-section through the Chutivske gas condensate field. Fig. 1c demonstrates a seismic section with a diapir intersected by wells 1 and 2. The first well shows industrial gas inflows from the Upper Visean sand reservoir, and the second one is drilled into watered-saturated sandstone. A comprehensive

analysis suggests that well 1 opened a trap shielded by a salt wing and one of the faults. In addition to the above objects, it should be noted that many diapirs in the DDB are accompanied by specific accumulative bodies in the Slavic formation, partially or completely covered by Lower Permian salt wings. These bodies are composed predominantly of carbonate rocks and have good reservoir properties. Fig. 1b shows one of these objects associated with the Khrestishchenskiy salt dome.

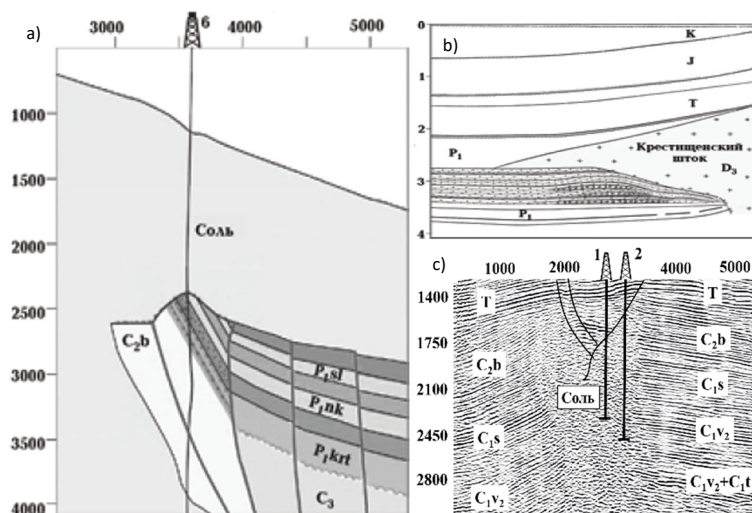


Fig. 1. Cross-section
(through: a) Chutivske gas condensate field; b) Khrestishchenskiy salt dome;
c) Bakeiskiy salt dome located in DDB) obtained from pre-stack depth migration

Analysis of recent research and publications reveals attempts to visualize the geological environment near the salt diapir. In many publications, the authors give a detailed analysis of individual methods, without using an integrated approach. For example, (Jurado, Sinoquet, & Ehinger, 1996) describe the usage of 3D reflection tomography in their study of complex geological structures. In addition, (Jones, 2008) in "Effects of pre-processing on reverse time migration: the North Sea" studies diffracted multiples and back-scattered noise, developing an apex-shifted approach and more recently using 3D SRME. In their study of diapirism, (Shafiq et al., 2017) use phase congruency to detect salt domes within migrated seismic volumes. (Soleimani, Aghajani, & Heydari-Nejad, 2018) place importance on applying the normalized full gradient (NFG) method in the processing of potential field data to detect salt dome boundaries. The papers above propose new individual approaches to mapping salt domes. Unfortunately, every method has its disadvantages. Thus, the relevance of further research is driven by the additional benefits of a complex approach that will integrate methods the effectiveness of which has been particularly proven and which will therefore be effective for the study of specific geological structures.

Domestic scientists have explored integrated approaches to obtain highly informative seismic images. For instance, in their paper on advanced seismic imaging techniques, (Tiapkina, Tyapkin, & Okrepkyi, 2014) analyzed various types of hydrocarbon traps associated with salt domes in the Dnieper-Donets basin. Moreover, a classification of methods for seismic imaging was developed. Using examples from other sedimentary basins, the authors showed the benefits of pre-stack migration, the importance of multipathing of seismic energy, and the application of converted waves in imaging of near salt domes.

The relevance of this research is determined by the fact that, depending on the nature of the tectonic discontinuities of the synchronization axis, they can be traced on both sides of the axis. Tectonic discontinuities can either overlap or form a zone of the absence of wave field reflections. Sometimes, the areas of discontinuity are distinguished by the damping of oscillations. Often, in such areas, it is impossible to trace any reflective horizons, which made it necessary to improve the approach to obtaining and interpreting data in areas shielded by faults.

The purpose of the research is to develop a comprehensive approach to obtaining and interpreting data in areas shielded by faults or steep horizons associated with salt diapirism to enhance horizon visualization and obtain a geological section representing the real environment as accurately as possible.

Methods

In seismic survey planning and during ray tracing analysis, the principal objective is often to model the seismic response of a given target reflector in the depth domain. In particular, when the overburden geology is complex, e.g., with salt structures between the acquisition level and the reservoir zone, it is of special interest to try to simulate the target response, reflection and refraction of seismic rays for given acquisition geometries. A salt dome may cause distortion of seismic reflection beneath it in the time domain due to the tremendous wave transit velocity difference between salt rock and its surrounding rocks, giving rise to fake structures and fake faults in seismic interpretation (Fig. 2). If there are several paths of seismic energy propagation in the strata, it is necessary to select the option most suitable for depicting the target boundaries. Typically, trajectories are selected that have the minimum travel time or maximum calculated energy (Legott, Cowley, & Williams, 2004).

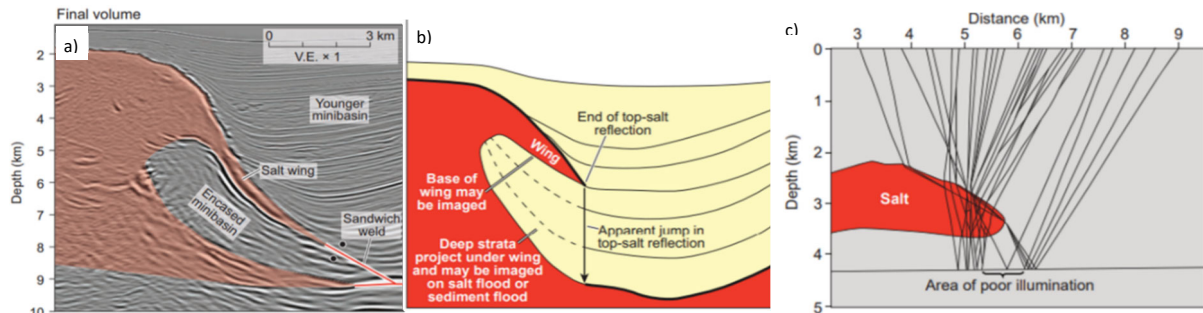


Fig. 2: a) encased horizons are overlain by a thin salt wing; b) criteria to identify a rotated salt wing; c) poor illumination zone below the salt wing (Jackson, & Hudec, 2017)

Ray tracing. Over the past twenty years, 3D seismic ray tracing has evolved from a research tool to a more operational tool in the petroleum industry. Simulated rays can be used to create ray attributes and synthetic seismograms for real 3D surveys with a large number of source and receiver points. The ray theory belongs to the methods most frequently used in seismology and seismic exploration for forward and inverse modelling of high-frequency seismic body waves and studying the propagation of seismic waves in layered subsurface with varying elastic parameters. In the case of applying a point source in the starting point of the ray, various attributes could be calculated by ray tracing travel time, amplitude, geometric spreading, etc. as Green's function attributes. Typically, each ray must be tested for intersection with a certain subset of all the objects in the model. A complex structural and tectonic model of the research area results in the creation of field zones poorly illuminated by seismic waves. Additionally, for subsalt reflections, the wavefield can be reflected back into the salt. Therefore, only a small amount of energy can reach the surface even if the seismic waves have reached the subsalt horizons (Cao, & Brewer, 2013).

The workflow started with locating sources and receivers, creating a structural model, and implementing a velocity model. Ray tracing modeling was performed in the survey to image the salt dome. A geological model was built to simulate the effects of salt domes on pre-salt reflection and to investigate the effect of salt dome thickness on pre-salt seismic reflection. The aim of ray tracing is to obtain a model of propagation, reflection, and refraction of seismic rays in a geological environment, modeled based on the available seismic data. The complete geologic environment model used for ray tracing consists of horizons, faults, and interval velocities. The next step was to analyze the target horizon below the salt wings selected as the reflection horizon. A combination of the rays' paths as a minimum distance from the source and receiver to the reflective horizon allows modeling the path of the reflected wave. The focus was on showing the effect of the wave transit velocity in the salt dome on pre-salt seismic reflection and the effect of low velocity interbeds in the salt dome on pre-salt seismic reflection. In addition, to illustrate the poor illumination zone, the multiplicity was calculated according to the coordinates of the intersection points of the ray trajectories.

Fig. 3 shows the results of an illumination survey from a series of uniformly spaced sources on the surface, shooting at a series of uniformly spaced receivers distributed over a 50 × 50 m grid (Fig. 3a). Even with a high resolution seismic, the geometry of the salt body (Fig. 3b-c) leads to the appearance of a poorly illuminated area in the target location (Fig. 3d-e). Images resulting from ray tracing will be overburden by migration artifacts in the target area, so ray tracing results help the interpreter with salt diapir mapping.

Unfortunately, the structure under the salt body is almost invisible, which is probably the result of insufficient ray density under the salt. Nevertheless, the main advantage of ray tracing is its realistic rendering of reflections, refractions, and shadows.

Seismic attribute analysis. The presence of salt bodies causes numerous challenges both at the stage of processing and at the stage of seismic data interpretation. One of the tools demonstrating a good result is the seismic attribute analysis, which allows qualitative assessment of dynamic and kinematic parameters of the seismic field and contouring the salt body according to the characteristics of the seismic signal.

Seismic attributes are important because they enable interpreters to extract more information from seismic data; they can facilitate spotting geological features and simplify seismic interpretation. Different seismic attributes are used for different geological problems. The following attributes are most often used when working with a salt dome: chaos helps to delineate salt extents; instantaneous phase determines the continuity boundary of sediments at the salt face; dip illumination is used to detect and highlight chaotic/noisy areas; amplitude contrast helps highlight and isolate salt structures among other types of rocks. The best approach is to use a number of complementing attributes, for instance, analysis of noisy areas, amplitude contrast, and fracturing zones. The result of an integrated attribute analysis can be seen in Fig. 4b, where the salt dome contour can be clearly observed. The result of migration is shown in Fig. 4a. Obviously, the layers which are closer to the surface are better visualized than the deeper ones, so the contour of the salt body can be recognized.

Results

Classical Kirchhoff migration is based on a single-ray scheme and, therefore, is usually not efficient enough in conditions of intense salt tectonics. An integrated use of ray tracing results and seismic attribute analysis provides good results in delineating hidden stratigraphic features that are not present in the legacy data. Analysis results shown in Fig. 4 confirm the presence of a narrower salt body below the wider upper part. This confirms the effectiveness of the proposed approach, which allows a more accurate determination of the geometry of the geological target. The application of the proposed strategy on the seismic data with an irregularly-shaped salt dome provided an appropriate image for the final structural and stratigraphic interpretation.

In Fig. 5, the colored lines were used to outline the salt dome. An integrated approach made it possible to prevent the impact of structural-tectonic features on the formation of the poor illumination zone. Thus, the reason for the weak seismic signal is not the tectonically shielded faults but the poor illumination zone below the salt caused by the seismic acquisition parameters. The location of the shadow zone was derived from the ray tracing results. The following step

was to identify the presence of seismic signals after migration in the poor illumination zone. For this purpose, the seismic attribute analysis was used (in particular, Chaos,

which maps the chaotic behavior of the local seismic signal from the statistical analysis of dip/azimuth estimate) as an additional source of information for salt dome detection.

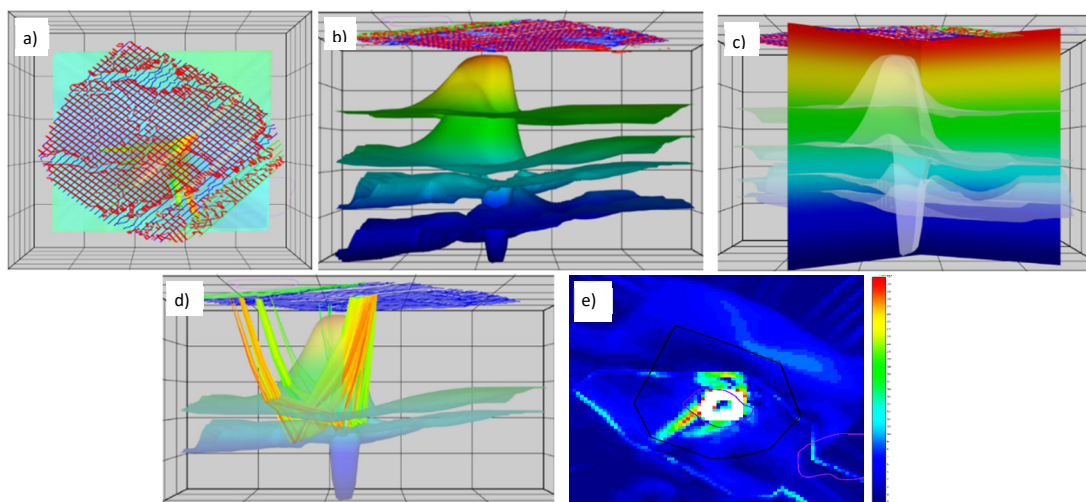


Fig. 3: a) Source and receiver points in the survey area; b) Structural model for the survey with a salt dome; c) velocity model over key horizons; d) ray tracing modeling from the target horizon below salt wings; e) dip angle attribute map

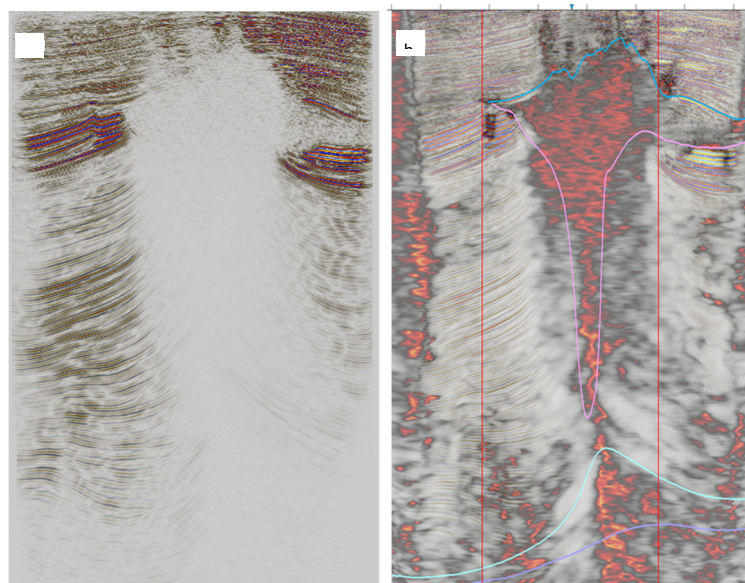


Fig. 4: a) Migrated PSDM section; b) Chaos attribute computed on the seismic after the salt body modeling confirms the approximate shape of the salt diapir

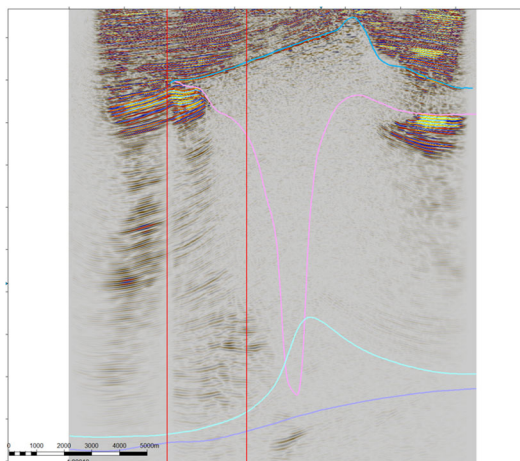


Fig. 5. Seismic cube cross section with the salt dome contour after applying an integrated method (ray tracing and seismic attribute analysis)

Discussion and conclusions

Hydrocarbon traps associated with salt domes cannot be accurately detected and further confirmed by drilling without obtaining a reliable structural-tectonic model. We have proposed a comprehensive approach to salt tectonics analysis involving a combination of methods to solve the problem of mapping seismic horizons in areas adjacent to fault zones with a weak seismic signal. This incorporates techniques such as ray tracing and seismic attribute analysis to create a more robust geological image. An integrated application of these methods demonstrates consistent geological results and has implications for the discovery of new deposits and hydrocarbon traps confined to the zones of salt dome tectonics within the Dnipro-Donets basin.

Authors' contribution: Natalia Rusachenko – conceptualization, formal analysis, methodology, writing (original draft); Tetiana Pastushenko – writing (review and editing); Serhiy Vyzhva – data validation, writing (review and editing).

References

Cao, J., & Brewer, J. D. (2013). Critical reflection illumination analysis. *Interpretation*, 1(1), T57–T61. <https://doi.org/10.1190/INT-2013-0031.1>

Наталія РУСАЧЕНКО, асп.

ORCID ID: 0000-0002-7407-696X

e-mail: rusachenko_natasha@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Тетяна ПАСТУШЕНКО, канд. філол. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-9826-5004

e-mail: t.pastushenko@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Сергій ВИЖВА, д-р геол. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0003-4091-6649

e-mail: s.vyzhva@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Jackson, M. P. A., & Hudec, M. R. (2017). *Salt Tectonics*. Cambridge University Press.

Jones, I. F. (2008). Effects of pre-processing on reverse time migration: a North Sea study. *First Break*, 26.

Jurado, F., Sinoquet, D., & Ehinger, A. (1996). 3D reflection tomography designed for complex structures. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 711–714. <https://doi.org/10.1190/1.1826748>

Legott, R., Cowley, J., & Williams, R. (2004). The case for applying wave equation depth migration in the North Sea. *First Break*, 22(8), 75–80.

Shafiq, M. A., Alaudah, Y., Di, H., & AlRegib, Gh. (2017). Salt dome detection within migrated seismic volumes using phase congruency. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2360–2365. <https://doi.org/10.1190/segam2017-17443246.1>

Soleimani, M., Aghajani, H., & Heydari-Nejad, S. (2018). Salt dome boundary detection in seismic image via resolution enhancement by the improved NFG method. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 53. <https://doi.org/10.1007/s40328-018-0222-3>.

Tiapkina, A., Tyapkin, Yu., & Okrepkyi, A. (2014). Advanced methods for seismic imaging when mapping hydrocarbon traps associated with salt domes. *Geophysical Journal*, 36(3), 86–104 [in Russian]. [Тяпкина, А., Тяпкин, Ю., & Окрепкий, А. (2014). Усовершенствованные методы построения сейсмических изображений при картировании ловушек углеводородов, связанных с соляными куполами. *Геофизический журнал*, 36(3), 86–104].

Отримано редакцією журналу / Received: 02.04.24

Прорецензовано / Revised: 11.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

МОДЕЛЮВАННЯ СОЛЯНО-КУПОЛЬНИХ СТРУКТУР У ГЛИБИННОМУ ДОМЕНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАСУВАННЯ ПРОМЕНІВ ТА АНАЛІЗУ СЕЙСМІЧНИХ АТРИБУТІВ

Вступ. Збільшення ресурсної бази та видобутку вуглеводнів є основною метою сейсморозвідувальних робіт. У зв'язку з наявністю в геологічному середовищі соляних діапирів, розломів, скидів і підкидів з'являються характерні особливості сейсмічного сигналу – розрив суцільності фази і значне згасання амплітуди без розриву суцільності фаз. Іноді такі геологічні утворення ідентифікуються ослабленням сейсмічного сигналу або навіть відсутністю відбиттів у сейсмо-хвильовому полі. Часто на ділянках розвитку солянокупольної тектоніки взагалі неможливо простежити відбивальні горизонти. Для достовірного відображення місця розлому, крутопадаючих чи вертикальних контактів необхідно вдосконалити підхід до роботи з даними на ділянках з густою сіткою розломів і складною геологією.

Методи. У дослідженні представлено комплексний підхід моделювання променів від кожного приймача сейсмічних сигналів до кожного біна на відбивальній границі. Потім відбиті промені поширювалися в геологічному середовищі від відбивальної границі до заданого положення сейсмічного приймача. Оскільки характер і швидкість їхнього поширення різні, то є можливість отримати додаткову інформацію із зон, екранованих розломами чи вертикальними контактами, дослідити траєкторії поширення сейсмічної енергії та зони її фокусування/дефокусування. Перевірка сейсмічного зображення та його геологічної змістовності була виконана за допомогою аналізу сейсмічних атрибутів.

Результати. Трасування променів дало змогу проаналізувати зону поганого освітлення під соляними крилами. Під час подальших кроків, таких як обробка та інтерпретація, трасування променів надало додаткову інформацію для оконтурення діапіру. Як додатковий інструмент для визначення меж соляної структури використано аналіз сейсмічних атрибутів. Це сприяло аналізу динамічних і кінематичних параметрів сейсмічного поля та на основі цих характеристик картографуванню меж соляного тіла.

Висновки. Комплексний підхід із залученням кількох методів допоможе розв'язати завдання простеження сейсмічних горизонтів на ділянках, що оточують зони розломів зі слабким сейсмічним сигналом. Достовірніше геологічне зображення можна отримати, лише використовуючи комплексні підходи, що передбачають не тільки сейсмічне оброблення, але й трасування променів, аналіз сейсмічних атрибутів. Комплексне застосування методик демонструє геологічно змістовні результати та створює передумови для відкриття нових родовищ і пасток вуглеводнів, які приурочені до зон розвитку солянокупольної тектоніки Дніпровсько-Донецької западини.

Ключові слова: трасування променів, оброблення сейсмічних даних, аналіз сейсмічних атрибутів, інтерпретація, соляна тектоніка, діапір.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні пропублікації 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/10.17721/1728-2713.106.06>

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

ORCID ID: 0000-0002-1837-9739

e-mail: vladvam@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВИСОКОПЕРСПЕКТИВНІ ОБ'ЄКТИ МІНЕРАЛЬНО-СИРОВИННОЇ БАЗИ УКРАЇНИ.
ЧАСТИНА 2. НЕМЕТАЛІЧНІ КОРИСНІ КОПАЛИНИ

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

Наведено стислий опис високоперспективних об'єктів мінерально-сировинної бази неметалічних корисних копалин України, на основі експертної оцінки їхньої інвестиційної привабливості. Як найперспективніші виділені такі види сировини: каолін (Жежелівське, Глуховецьке, Турбівське, Великогадоминецьке родовища); облицювальне каміння (Сліпчицьке і Головинське родовища лабрадориту; Омелянівське, Токівське, Капустянське, Лизницьке і Корнинське родовища граніту); тугоплавкі глини (Часів-Ярське, Новорайське, Володимирівське, Пологівське); графіт (Заваллівське, Буртинське (Хмельська ділянка) родовища); гранат (Слобідське, Іванівське); кварцова сировина (Гусарівське, Великоглибовицьке); п'єзокварц (Волинське); фосфорити (Жванське); вапняки для цукрової промисловості (Замок, Лисогірка); бентоніт (Черкаське родовище). Ці родовища серед неметалічних корисних копалин України мають найвищий рівень інвестиційної привабливості, найнижчі ризики інвестиційних вкладень і можуть бути рекомендовані як першочергові об'єкти для інвестування в їхнє вивчення і промислове освоєння. Для визначення перспектив інвестування конкретних об'єктів необхідна попередня геолого-економічна оцінка доцільності та рентабельності їхнього промислового освоєння.

Ключові слова: мінерально-сировинна база, родовище, неметалічні корисні копалини, інвестиційна привабливість.

Вступ

Постановка проблеми. Пропонована стаття є складовою серії статей (Михайлов, 2023а), присвячених оцінюванню інвестиційної привабливості об'єктів мінерально-сировинної бази (МСБ) України, що має вирішальне значення для повоєнного відновлення України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. МСБ неметалічних корисних копалин України розглянуто в низці досліджень (Гурський, 2008; Гурський та ін., 2006; Костенко, 2014; Михайлов та ін., 2008; Мінеральні ресурси..., 2021; Рудько, Озерко, & Шепель, 2015 та ін.); питання інвестиційної привабливості об'єктів МСБ України досліджено в роботах (Михайлов, 2023а; Михайлов, Вижва, & Паюк, 2022; Mykhailov, Hrinchenko, & Malyuk, 2022).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. У попередній статті (Михайлов, 2023b) розглянуто інвестиційну привабливість металічних корисних копалин України, у пропонованій статті доцільно охарактеризувати ті самі питання стосовно неметалічних корисних копалин.

Формулювання цілей статті. Ціллю цього дослідження є стисла характеристика високоперспективних об'єктів МСБ неметалічних корисних копалин України з метою встановлення їхньої інвестиційної привабливості й оцінювання ризику капіталовкладень, що може бути корисним для потенційних інвесторів.

Результати

Україна має велику базу неметалічних корисних копалин, представлених родовищами гірничохімічної, гірничорудної, металургійної, будівельної, агрохімічної сировини (апатит, барит, бішофіт, бром, глауконіт, сапоніт, сіль, сірка, фосфорит, графіт, каолін, целіт, цеоліт, ангідрид, глини та піски, перліт тощо). Як і металічні корисні копалини, за рівнем інвестиційної привабливості неметалічні корисні копалини теж можна розділити на чотири групи:

- **традиційні**, що інтенсивно розробляються в Україні вже тривалий час, мають значні розвідані запаси, забезпечують наповнення державного бюджету;

- **високоперспективні**, родовища чи прояви яких в Україні відомі, зі значними запасами чи ресурсами, але

поки що не розробляються або розробляються в незначних обсягах;

- **перспективні**, родовища чи прояви яких в Україні відомі, але запаси чи ресурси остаточно не встановлені, тому перспективи їхнього освоєння остаточно не визначені;

- **з невиясненими перспективами**, прояви та дрібні родовища яких відомі в Україні, проте їхні масштаби не надають підстав припускати значних ресурсів, або такі, які не користуються попитом на світових ринках.

До **традиційних** віднесені неметалічні корисні копалини, що мають стратегічне значення для економіки України і тривалий час розробляються: каоліни, піски формувальні, будівельне й облицювальне каміння, глини тугоплавкі. Вони мають високий рівень інвестиційної привабливості ($\geq 70\%$), низький ризик інвестиційних вкладень ($\leq 30\%$), але високу конкуренцію, оскільки ця "ніша" гірничого сектору промисловості України давно вже освоєна численними державними і приватними підприємствами.

Каолін. В Україні відомо близько 150 родовищ та проявів каоліну високої якості, запаси 42 родовищ враховані Державним балансом, 22 родовища розробляються. Запаси каоліну становлять 1 095,8 млн т, ресурси – 4 500 млн т. У 2020 р. видобуток досяг 1 569,6 тис. т. Збагачення каолінів здійснюється на Просянівському і Глуховецькому каолінових комбінатах і Турбівському каоліновому заводі.

Родовища каоліну найчастіше приурочені до кори вивітрювання гранітоїдів Українського щита (УЩ), але також відомі в Закарпатті і Дніпровсько-Донецькій западині (ДДЗ) (рис. 1). Вони належать до двох типів: первинні (основні та лужні) і вторинні.

Поклади первинних каолінів містяться в корі вивітрювання докембрійських гранітоїдів на глибині від 5 до 42 м, мають товщину від 1,4 до 120 м (середня 10–40 м). За вмістом Al_2O_3 виділяють нормально глиноземисті ($Al_2O_3 < 39\%$) і підвищено глиноземисті ($Al_2O_3 > 39\%$); SiO_2 – помірно кременисті (до 65–70 %) і кременисті ($> 70\%$); K_2O – нормальні (основні) ($< 2\%$) і лужні ($> 2\%$).

До найбільших родовищ первинних каолінів належать: Глуховецьке, Турбівське, Великогадоминецьке,

© Михайлов Володимир, 2024

Жежелівське, Просянівське, Біляївське, Білгородське, Пологівське, Володимирівське, Дібровське, Чаусівське та ін. Перші чотири родовища розміщені у межах

провідного в Україні Глуховецько-Турбівського каолінового району у Вінницькій обл.



Рис. 1. Схематична карта поширення родовищ каоліну (Гурський та ін., 2006):

а–б – родовища первинних каолінів, що не експлуатуються (а) та експлуатуються (б);

в–г – вторинних каолінів, що не експлуатуються (в) та експлуатуються (г).

Родовища: 1 – Лозовиківське, 2 – Вербівське, 3 – Котельнянське, 4 – Дубищанське, 5 – Житомирське, 6 – Крошанське, 7 – Костянтинівське, 8 – Кам'янобродське, 9 – Шаберівське, 10 – Смоківське, 11 – Токарівське, 12 – Дубрівське, 13 – Пило-Курманське, 14 – Городницьке, 15 – Олевське, 16 – Купецьке, 17 – Чмельське, 18 – Королівське, 19 – Максимівське, 20 – Киянка, 21 – Колонія Крук, 22 – Олександрівське, 23 – Бражинське, 24 – Урочище Кошари, 25 – Добринське, 26 – Чоповицьке, 27 – Домолецьке, 28 – Шатрищенське, 29 – Чигиринське, 30 – Межирицьке, 31 – Черевківське (Житомирська обл.); 32 – Голічувське, 33 – Дерманівське, 34 – Клесівське, 35 – Остківське (Рівненська); 36 – Токарівське, 37 – Купинське, 38 – Новацьке, 39 – Майдан-Вільське, 40 – Буртинське, 41 – Староліське, 42 – Городнівське (Хмельницька); 43 – Сумовка, 44 – Березни, 45 – Райківське, 46 – Хреновське, 47 – Парпуровецьке, 48 – Турбівське, 49 – Самгородське, 50 – Збарож-Губіно, 51 – Германівське, 52 – Красне, 53 – Глуховецьке (Вінницька); 54 – Циберманівське, 55 – Уманське, 56 – Новоселицьке (Черкаська); 57 – Софіївське, 58 – Катеринівське, 59 – Шпільевське, 60 – Петровське (Кіровоградська); 61 – Христофорівське, 62 – Гейківське, 63 – П'ятихатське, 64 – Васильківське, 65 – Софіївське, 66 – Усть-Кам'янське, 67 – Томаківське, 68 – Хутір Бігма, 69 – Славгородське, 70 – Афанасіївське, 71 – Роздольське, 72 – Роздорське, 73 – Вишневецьке, 74 – Циганівське, 75 – Нікольське, 76 – Просянівське (Дніпропетровська); 77 – Белаське, 78 – Михайло-Левшино, 79 – Запорізьке, 80 – Івано-Аннівське, 81 – Пологівське, 82 – Конкські Роздори (Запорізька); 83 – Володарське, 84 – Бохарівське, 85 – Преображенське, 86 – Богородицьке, 87 – Володимирівське, 88 – Костянтинівське (Донецька); 89 – Руднівське, 90 – Глухівське (Сумська); 91 – Квасівське, 92 – Берегівське, 93 – Керецьке, 94 – Дубриницьке (Закарпатська обл.).

Глуховецьке родовище представлене покладами первинних каолінів у корі вивітрювання гранітоїдів УЩ. Це білі породи лускатої і пелітоморфно-лускатої структури, смугастої та і гнейсоподібної текстури, середньої пластичності, жирні на дотик. Вони залягають субгоризонтально, їхня товщина змінюється від 1,0 до 48 м (середня 22,6 м). Розкриті породи представлені ґрунтово-рослинним шаром, четвертинними суглинками, пісками і глинами, неогеновими строкатими глинами (товщина від 1–6 до 16–29 м). Вміст Al_2O_3 змінюється від 22,5 до 28,7 % (середнє 23,0 %), вміст SiO_2 становить 60,4–72,6 % (середнє 67,7 %), вогнетривкість – 1690–1740 °С. Основними мінералами є каолініт (47–71 %) і кварц (10–45 %), зустрічаються гідрослюда, гетит і гідрогетит, мікроклін, акцесорні – апатит, монацит, циркон, лейкоксен, магнетит. Каоліни характеризуються високою якістю, їх можна використовувати для виробництва санітарно-будівельної кераміки і господарського фаянсу. Запаси родовища на 1 січня 2020 р. становили 107 658,9 тис. т. Родовище розробляють ПрАТ "Глуховецький гірничо-збагачувальний каоліновий комбінат" (ділянка 1) і ТОВ "АВК Українське каолінове товариство" (ділянка 2).

Інші родовища первинних каолінів мають подібну будову і склад (рис. 2).

Родовища вторинних каолінів також сконцентровані переважно на УЩ: Новоселицьке і Мурзинське (Черкаська обл.), Пологівське (Запорізька обл.) та ін. Вони описані в роботі (Михайлов, 2023а).

Отже, є широка гама можливостей з вибору об'єктів інвестування розробки каолінів України.

Піски формувальні. В Україні є багато родовищ формувальних пісків, приурочених до прибережно-морських відкладів буцацької світи еоцену і харківської світи олігоцену Донбасу (Гусарівське, Бантишівське, Шабельківське, Малинівське та ін.); континентально-морських відкладів полтавської серії й алювіальних сарматського ярусу неогену та четвертинного віку ДДЗ (Часів-Ярське, Ріпечьке, Вишневецьке, Старовірівське, Малинівське, Покотилівське та ін.) і УЩ (Бантишівське, Малишевське, Орловське, Хорошівське, Таромське, Дніпропетровське, Маловіськівське, Новоселівське, Полозьке, Оріхівське та ін.); тортонських і сарматських відкладів Волино-Подільської плити (ВПП) (Волощинське, Яцинівське та ін.) і буцацьких – схилів Воронезького масиву (рис. 3). Вони представлені лінзами і пластами, товщина яких змінюється від

1–5 м до 40 м (Михайлов, 2023а). Відомо понад 200 родовищ формувальних пісків, 21 родовище враховано у Державному балансі, розроблюються 10 родовищ. Загальні запаси сягають 826,1 млн т, видобуток у 2020 р. –

1 292,9 тис. т (Мінеральні ресурси..., 2021). Прогнозні ресурси формувальних пісків оцінюють у 12,5 млрд т (Гурський та ін., 2006).

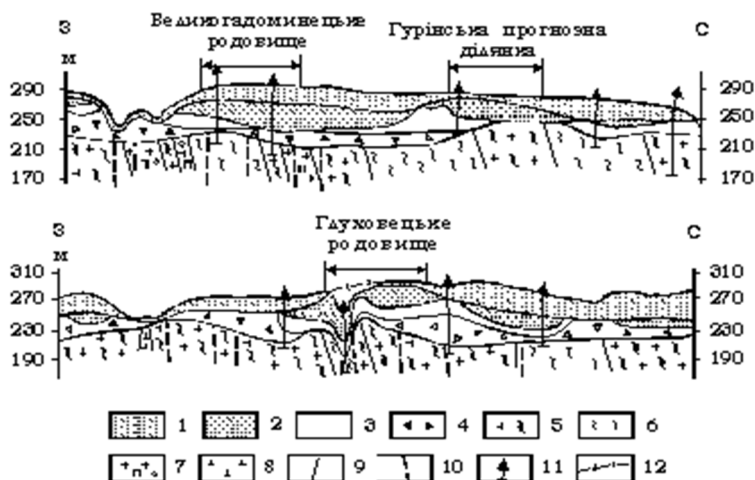


Рис. 2. Будова кори вивітрювання Глуховецько-Турбівського району (Михайлов та ін., 2008):
1 – кайнозойські відклади; 2–3 – зони вивітрювання каолінітів (2), гідрослюд (3); 4 – зона дезінтеграції;
5 – бердичівські граніти; 6 – смугасті мігматити; 7 – граніти амфітегматоїдні; 8 – піроксеніти; 9 – геологічні межі;
10 – розломи; 11 – бурові свердловини; 12 – денна поверхня 1901 р. на Глуховецькому родовищі

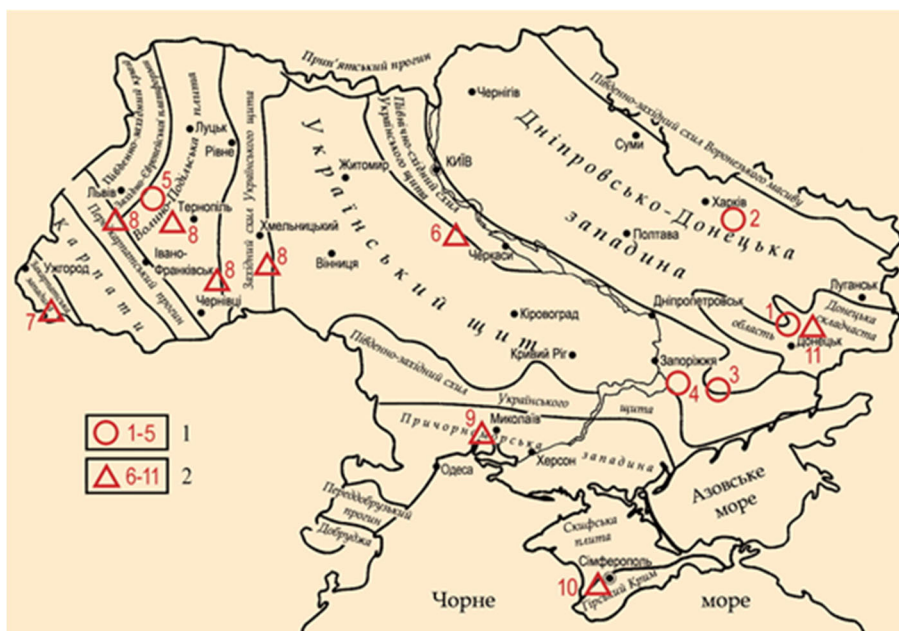


Рис. 3. Схема розташування родовищ пісків формувальних і бентонітових глин (Гурський та ін., 2006):
1 – піски формувальні (1 – Донбас; 2 – ДДЗ; 3 – Приазовський блок; 4 – Середньопридніпровський блок; 5 – ВПП);
2 – бентоніт (6 – Черкаське; 7 – Горське, Хижинське; 8 – Бережанське, Пижівське; 9 – Причорноморська западина;
10 – Курцівське, Кудринське; 11 – Григорівське)

Будівельне каміння. Україна надзвичайно багата на будівельне каміння, родовища якого відомі в межах УЩ (граніти, діорити, чарнокіти, гнейси, мігматити, кварцити, мармури), ВПП (базальти, пісковики, вапняки, мармуризовані вапняки, травертин, гіпс), Причорноморської западини (вапняки), Карпат (гранітогнейси, мармури, мармуризовані вапняки, андезібазальти, вулканічні туфи), Криму (мармуризовані вапняки, ракушняки), Донбасу (метаморфізовані пісковики, вапняки). У Державному балансі обліковано 947 родовищ будівельного каміння, загальні запаси яких сягають 8 820,5 млн м³, розроблюють 428 родовищ, де у

2020 р. було видобуто 39,0 млн м³ мінералів (Мінеральні ресурси України..., 2021).

На УЩ розроблюються родовища гранітів, діоритів, габро, гнейсів, кварцитів Клесівське, Пержанське, Овруцьке, Коростишівське, Бехівське, Малинське, Лезниківське та ін. (Житомирська обл.); Трикратівське, Олександрівське, Актівське, Ерастівське, Баланівське та ін. (Кіровоградська обл.); Недаїводське, Коломоївське, Велика Глеюватка та ін. (Дніпропетровська обл.); Янцівське, Передаточне, Запорізьке та ін. (Запорізька обл.); Каранське, Хлібодарівське, Андріївське та ін. (Приазов'я). У Донбасі експлуатуються родовища пісковиків, вапняків, базальту (Браунівське,

Санжарське, Монахівське, Вальянівське, Балка Комишева-ська). У Криму найбільшими є Шархинське родовище гранодіоритів і Мармурове родовище мармуризованих вапняків. У Закарпатті поширені родовища андезитів (Роко-сівське, Королівське, Кленовецьке), ріолітів (Косинське), перлітів (Мужіївське). Україна володіє практично безмеж-ними запасами і ресурсами будівельного каміння.

Облицювальне каміння. У Державному балансі об-ліковано 255 родовищ облицювального (декоративного)

каміння із запасами 329,9 млн м³, з яких 137 розроблю-ється, у 2020 р. видобуток сягав 587,6 тис м³ (Мінеральні ресурси..., 2021). Перспективними для видобутку декора-тивного каміння є: УЩ (габро, лабрадорит, граніт, граносі-еніт, гранодіорит, кварцит, мармур); Донбас (мармур, мармуризований вапняк, пісковик, гіпс, ангідрит); Карпати (мармур, мармуризований вапняк, андезит, туф); Крим (мармуризований вапняк, трас, діорит); ВПП (пісковик, гіпс, травертин, мармуризований вапняк) (рис. 4).

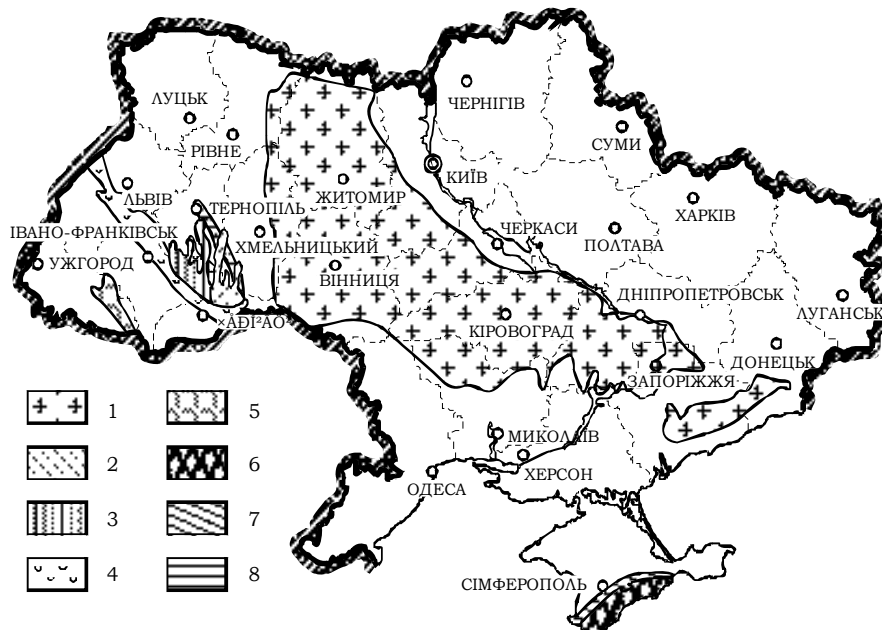


Рис. 4. Карта перспективних площ декоративного каміння України (Михайлов та ін., 2008):

- 1 – породи кристалічного фундаменту (граніти, гнейси та ін.); 2 – силурійські мармуризовані вапняки;
3 – девонські пісковики; 4 – неогенові гіпси; 5 – триасові і юрські мармури і вапняки, неогенові туфи;
6 – юрські мармуризовані вапняки; 7 – крейдові і палеогенові вапняки; 8 – неогенові вапняки

Головні об'єкти облицювального каміння пов'язані з інтрузивно-метаморфічними комплексами УЩ: архейськими гранітами мокромосковського, токівського, демуринського комплексів; палеопротерозойськими ультраметаморфічними гранітоїдами бердичівського, житомирського, уманського, кіровоградського, салтичанського, анадольського комплексів, інтрузивними масивами (Коростенський, Новоукраїнський, Корсунь-Новомиргородський, Південнокальчицький, Хлібодарівський). Головні інвестиційну цінність мають родовища габро і габроноритів, лабрадоритів, гранітів, мармурів і мармуризованих вапняків.

Габро і габронорити представлені родовищами Сліпчицьке, Головинське, Букинське, Горбулівське в Житомирській обл., Броніславське і Ясногорське – у Рівненській. Розробляються габроїди Коростенського і Корсунь-Новомиргородського плутонів (Сліпчицьке, Букинське, Бистрівське, Ямпільське, Торчинське, Шадурівське, Губенківське, Слобідське родовища).

Лабрадорити приурочені переважно до Коростенського плутону, за декоративністю серед них виділяють три основні різновиди: темно-сірі й чорні головинського типу із синьою, зелено-блакитною та золотистою іризацією (Головинське, Федорівське, Горбулівське, Слобідське в Житомирській обл.); світло-сірі й сірі турчинського типу з блакитною та сріблястою іризацією (Синій Камінь, Кам'яна Піч, Гута Добринське в Житомирській; Лікарівське в Кіровоградській обл.); сірі, світло-сірі кропивнянського типу без іризації (Кропивнянське, Васьковицьке, Ісаківське в Житомирській обл.).

Родовища гранітів за декоративними властивостями об'єднуються в чотири групи: світло-сірі, сірі граніти зі слабким блакитним і зелено-блакитним відтінками, дрібно- й середньозернисті однорідні житомирського й антонівського типу (Богуславське, Янцівське, Уманське, Салтичанське, Житомирське, Човнівське, Мочулянське в Житомирській, Запорізькій і Київській обл.); порфіроподібні середньо- і крупнозернисті граніти з подібним забарвленням (Коростишівське, Костянтинівське, Кудашівське, Жежелівське, Клесівське, Покостівське, Танське в Житомирській, Кіровоградській, Миколаївській обл.); червоні, рожеві, коричнево- та сіро-рожеві граніти в Житомирській (Омелянівське, Лезниківське, Дідковицьке, Корнинське), Кіровоградській (Капустинське, Войнівське, Горіхівське), Миколаївській (Новоданилівське, Трикратненське), Дніпропетровській (Токівське) і Рівненській (Осмалинське) обл.; сіро-зелені (Маслівське, Кубинське). Декоративну цінність мають червоні та рожеві граніти третьої групи. Міжнародного визнання серед них набули граніти Капустинського родовища (торгова марка "Rosso Santiago"), рожево-червоний крупнозернистий граніт Омелянівського родовища ("Rosso Toledo"), які не поступаються за своїми характеристиками аналогічним елітним гранітам Фінляндії ("Carmen Red"), Швеції ("Vanga"), Бразилії ("Сапао Bonito"). Високі декоративні і фізико-механічні властивості гранітів родовищ Войнівське, Межирицьке, Дідковицьке, Токівське визначають їхню перспективність на міжнародному ринку природного каміння.

Мармури і мармуризовані вапняки поширені на УЩ (родовища Козіївське, Радомишльське, Негребівське), у Закарпатті (Великокам'янецьке, Новоселицьке, Діловецьке, Головатицьке, Малорозинське, Гора Соколина, Полунське), у Донбасі (Христище, Корупька, Каракубське, Докучаєвське, Новопавлівське), у Криму (Гаспринське, Балаклавське, Біюк-Янкойське, Каранське, Мармурова Балка).

Серед інших потрібно згадати родовища мшанкових, оолітових і нумулітових вапняків білого та жовтуватобілого кольору в Криму (Бодракське-Альминське, Скелясте, Кримбальське, Інкерманське, Білогорське); травертину – у Хмельницькій (Великокужелівське); туфів – у Закарпатській (Беретянське); пісковиків – у Тернопільській (Буданівське, Застінківське, Теребовлянське), Луганській (Троїцьке), Івано-Франківській (Городницьке, Бабинське) обл.; гіпсу й ангідриту – у Придністров'ї (Тростянецьке, Колоколинське, Приозерне, Мамалізьке, Журавнівське, Добрівлянське), які мають високу декоративність і становлять практичний інтерес для використання їх у будівництві й архітектурі.

Отже, Україна має необмежені можливості для видобутку будівельного й облицювального каміння, а завдяки своїм високим декоративним властивостям воно посідає гідне місце на міжнародному ринку.

Глини тугоплавкі. В Україні родовища тугоплавких глин відомі на Донбасі, в ДДЗ, на УЩ, ВПП, Закарпатському прогині. У ДДЗ і на Донбасі поклади аргілітів й алевролітів пов'язані з відкладами картамишської світи нижньої пермі і юрськими утвореннями, а тугоплавких глин – з неогеновою полтавською світою. Товщина пластів коливається від 0,6 до 63,5 м. На ВПП відомі пласти і лінзи (0,3–27 м) глин й аргілітів неогенового віку. На УЩ пласти тугоплавких глин (до 20,6 м) пов'язані з неогеновими і четвертинними відкладами, у Закарпатті поклади глин (0,5–18,9 м) приурочені до четвертинних відкладів.

Тугоплавкі глини характеризуються високою вогнетривкістю (1350–1580 °С) і пластичністю, широким діапазоном спікання; вміст глинозему – 18–24 %, кремнезему – 50–60 %, оксидів заліза – 10–12 %. За мінеральним складом виділяють два головні типи глин: гідролітичні

(Часів-Ярське, Новорайське, Дружківське й інші родовища) і каолінітові (П'ятихатське, Кіровоградське, Озернянське, Глухівське та ін.).

У Державному балансі обліковано 31 родовище тугоплавких глин, загальні запаси дорівнюють 1 079,6 млн т, розробляються 20 родовищ, де в 2020 р. було видобуто 4 547,9 тис. т сировини (Мінеральні ресурси..., 2021).

Основним районом розвитку тугоплавких глин є Донбас, де відомі такі родовища, як: Часів-Ярське, Попаснянське, Артемівське, Курдюмівське, Карлівське, Віролюбівське, Донське, Новорайське, Веселівське, Октябрське, Торцьке, Андріївське, Новошвейцарське, Новооктябрське, Пологівське, П'ятихатське, Дружківське, Абрамівське, Тройчатє, Грузьке та ін. (Михайлов, 2023а).

На УЩ відомі родовища Пологівське, Володимирівське, Кіровоградське, Шостаківське, Івано-Благодатнівське, Кам'янецьке, П'ятихатське, Саксаганське, Веселі Терни, Новопетрівське, Девладівське та ін.

До *високоперспективних* видів сировини віднесені графіт, солі калійні, абразивна сировина, кварцова сировина, сировина п'єзооптична. Вони мають високий рівень інвестиційної привабливості ($\geq 70\%$), низькі ризики інвестиційних вкладень ($\leq 30\%$), характеризуються середнім рівнем конкуренції.

Графіт. В Україні родовища графіту приурочені до структур УЩ у межах чотирьох рудних районів: Побузькому (Заваллівське в Кіровоградській обл.), Криворізькому (Петрівське та Балахівське в Кіровоградській обл.), Волинському (Буртинське у Хмельницькій обл.), Приазовському (Троїцьке у Запорізькій та Маріупольське у Донецькій обл.) (Mykhailov, Zagnitko, & Lyzhachenko, 2021). Загальні запаси графіту цих родовищ оцінюють у 343 млн т руди та 19,8 млн т графіту (табл. 1). З них розробляють Заваллівське та Балахівське родовища. Динаміка видобутку останнім часом була нерівномірною (табл. 2).

Пропозиції для ліцензування на видобування (Городнявська ділянка) і на розвідку (Хмельівська ділянка) відкриті на Буртинському родовищі у Хмельницькій обл., на розвідку – на Млинківській пошуковій площі у Кіровоградській обл. (Державна служба геології..., 2021).

Таблиця 1

Запаси родовищ графіту, тис. т (Мінеральні ресурси..., 2021)

Родовище	А+В+С ₁		С ₂	
	руда	графіт	руда	графіт
Заваллівське	79 928,3	5 030,5	14 613,0	744,2
Петрівське	7 523,0	540,0	1 696,0	115,0
Балахівське	23 936,0	1 302,0	18 469,0	820,0
Буртинське	113 390,9	6 584,7	64 964,1	3 822,7
Троїцьке	2 027,0	163,0	252,0	14,0
Маріупольське	3 440,0	135,0	1 347,0	41,0
Всього	230 245,2	13 755,2	101 341,1	5 556,9

Таблиця 2

Динаміка видобутку графіту в Україні у 2010–2019 рр., тис. т (Mykhailov, Zagnitko, & Lyzhachenko, 2021)

Роки	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Руда	-	18,7	91,9	28,1	104,0	111,2	103,0	263,5	218,9	27,4	93,1
Графіт	-	0,9	7,0	2,0	8,0	7,9	6,1	13,9	12,2	1,5	5,2

Крім того, відомі численні прояви графіту: Кошаро-Олександрівський, Південно-Хашуватський, Дубинівський у Побузькому р-ні; Бабенківський, Лозоватський, Овнянський – у Криворізькому; Темрюцький, Каратюхський, Сачкинський – у Приазовському; Махаринецький, Дубовецький у Волинському.

Заваллівське родовище є родовищем світового класу, воно неодноразово описано в геологічній літературі (Гурський та ін., 2006; Костенко, 2014; Михайлов та ін.,

2008; Михайлов, 2023а; Mykhailov, Zagnitko, & Lyzhachenko, 2021 та ін.). Родовище приурочене до біотит-графітових гнейсів хашувато-заваллівської світи архею, де виділяється до 40 пластовидібних рудних тіл довжиною від 200 до 1200 м, товщиною від 3,5 до 80 м. Графіт у рудах крупно-лускуватий (2–4 мм), його вміст 6–14 % (середній 6,5 %), у рудах наявний гранат (6–31 %) (рис. 5). Загальні запаси графітової руди – 95,3 млн т, графіту – 5,8 млн т.

Родовище здавна розробляє Заваллівський графітовий комбінат кар'єрним способом. Річна проектна потужність комбінату 800 тис. т графітової руди або 35 тис. т графітового концентрату. На початку 90-х років випуск продукції перевищував 40 тис. т, потім почав різко знижуватися і нині перебуває на рівні 4–8 тис. т на рік. Проектні потужності як кар'єру, так і комбінату дають змогу різко наростити виробництво графітового концентрату, який відповідає вимогам до сировини для виробництва гальванічних елементів та лужних акумуляторів (зольність 10–14 %, вологість до 1 %, вихід летких речовин до 1 %, вміст міді до 0,05 %, домішки кобальту, нікелю, свинцю, миш'яку – сліди).



Рис. 5. Графітові гнейси Заваллівського родовища з гранатом (червоне)

Як об'єкт ліцензування інтерес викликає **Хмельівська ділянка** Буртинського родовища площею 143,3 га. Усього на площі родовища було виявлено й опошукано дев'ять ділянок, найперспективнішою з яких виявилася Буртинська ділянка з прогнозними ресурсами графітової руди 423,2 млн т, графіту – 25 млн т, як перспективні були виділені чотири ділянки (Городнявська, Матроська, Хмельівська, Лісова), а загальні запаси й ресурси графітової руди за категоріями C_2 і P_1 були визначені у 350 млн т (Державна служба геології..., 2021). Рудна товща розміщена на північно-східному крилі Шепетовської антикліналі у Волинському блоці УЩ, складеної графіт-біотитовими гнейсами і мігматитами раннього докембрію. Мінеральний склад руд: графіт, польовий шпат, кварц, біотит, серицит, каолінит, нонтроніт, монтморилоніт, хлорит, гідроксиди заліза; акцесорні – сульфіді, апатит, гранат, ільменіт, циркон, монацит. Графіт представлений тонкою вкрапленістю, лускуватими агрегатами і прошарками по гнейсуватості вмісних порід. Графіт по породі розповсюджений достатньо рівномірно, інколи зустрічаються збагачені прошарки та гнізда. Вміст графіту коливається від 4,4 до 11,9 %, середній вміст становить 5,76 %. Підрахунок запасів на ділянці не проводили, прогнозні ресурси оцінюють у 423,2 млн т руди і 25 млн т графіту (Державна служба геології..., 2021). Інші родовища описані в роботі (Михайлов, 2023а).

Отже, за ресурсами графіту, обсягами родовищ і якістю сировини Україна здатна забезпечити потреби європейської промисловості у графіті для "зелених технологій" на стадії промислової експлуатації відомих родовищ. Нині найбільший інвестиційний інтерес

становить Хмельівська ділянка Буртинського родовища, на яку відкриті ліцензійні пропозиції.

Солі калійні. В Україні калійні солі розвинені переважно в Передкарпатському крайовому прогині, де вони приурочені до калуських верств стебницької і воротищенської світ неогену. Калійні солі представлені пласто- і лінзоподібними покладами (товщина 3–120 м), розвинені на глибині 600–700 м. Виділяються хлористі солі, сформовані сильвінітом і карналітом; сірчано-кислі солі з каїнітом, лангбейнітом, полігалітом, шенітом; змішані сірчано-кисло-хлористі солі. Вміст K_2O змінюється від 9 до 21 %. Державним балансом запасів обліковуються запаси 13 родовищ у кількості 3 627,4 млн т руди і 411,0 млн т K_2O , однак вони потребують переоцінки (Мінеральні ресурси..., 2021). До 2007 р. видобуток солей здійснювали на родовищах Калуш-Голинське в Івано-Франківській обл. (БАТ "Оріана") і Стебницьке у Львівській обл. (ДГХП "Полімінерал"), але відтоді родовища не розробляють.

Стебницьке родовище калійних солей у Львівській обл. приурочене до загорської та верхньоворотищенської світ Передкарпатського прогину, де виявлено п'ять калійних горизонтів, які залягають серед соленосних піщано-глинистих брекчій і глинистої кам'яної солі (рис. 6). Найпотужнішим є другий горизонт, що охоплює шість головних пластів. Породоутворювальні мінерали – галіт, каїніт, лангбейніт, сильвін, домішки – полігаліт і кізерит, другорядні мінерали – ангідрит, шеніт, гіпс, епсоміт і карналіт. Каїніт зустрічається у вигляді дрібнозернистих агрегатів, паралельно-волокнистих і радіально-волокнистих утворень. На базі родовища раніше працював Стебницький калійний комбінат, який випускав калімагнезій, однак у зв'язку з багатьма екологічними проблемами видобуток солей було призупинено. Запаси сирової солі на Стебницькому родовищі становлять 1 519,1 млн т.

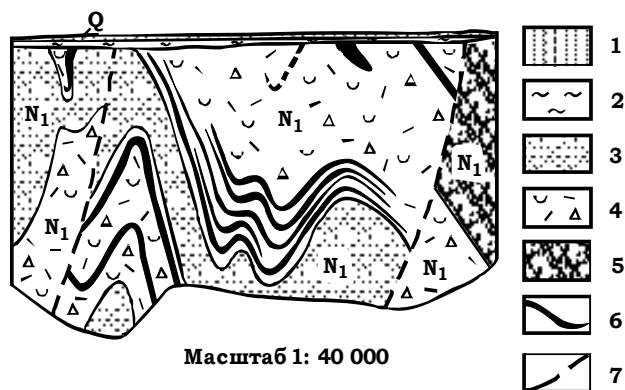


Рис. 6. Геологічний розріз Стебницького родовища калійної солі (Михайлов та ін., 2008):

- 1 – глини, суглинки, галечники; 2 – гіпсо-глиниста кора вивітрювання; 3 – пісковики; 4 – соленосні брекчії та глини; 5 – піщано-глинисті слабо засолені породи; 6 – сіль калійна в соленосній товщі; 7 – тектонічні порушення

Калуш-Голинське родовище приурочено до голинської (верхньостебницької) світи міоцену. Серед соленосних порід розвинені сильвінітові горизонти, сформовані сильвіном з домішками ангідриту, полігаліту й карналіту. Каїнітові поклади представлені прошарками. За мінеральним складом поклади поділяють на карналітові, каїнітові, сильвінітові та лангбейніто-каїнітові з домішками галіту, полігаліту, кізериту. На базі родовища раніше працював Калуський хіміко-металургійний комбінат, що випускав мінеральне добриво у вигляді хлористого калію (KCl),

сульфату калію (K_2SO_4), калімагнезії ($K_2SO_4 + MgSO_4$), полігалітового залишку, хлористого магнію ($MgCl_2 \times 2H_2O$), сульфату натрію (Na_2SO_4), як побічний продукт – харчову й кормову сіль. Запаси руд родовища – 448,2 млн т.

Крім згаданих, у Передкарпатті відомо ще про низку родовищ калійних солей: Бориславське, Доброгостівське, Помярки, Улично, Нинів, Дреголюкське, Гірке, Росильнянське, Старунське, Марківське, Молодківське, Кадобна, Тростянецьке, Тура Велика, Моршинське, але вони не готові для відпрацювання.

У ДДЗ прояви калійної солі виявлені на 16 куполах, але тільки на Роменському промислова калієносність (КСІ до 39 %) розміщена на невеликій глибині (300–500 м), решта проявів перебувають на глибині 1,5–2,0 км. Це дає змогу розглядати ДДЗ як регіон, перспективний для пошуку родовищ калійних солей.

На Донбасі виявлені дві калієносні зони: верхня – сильвініт-карналітова (до 60 м) і нижня сильвінітова (70–100 м) серед соленосних відкладів краматорської світи нижньої пермі Бахмутської та Кальміус-Торецької улоговин. Калійні солі представлені карналітом, сильвінітом, полігалітом і лангбейнітом, вони залягають у вигляді прошарків й окремих пластів, включень у суцільній масі кам'яної солі. Пласти мають невелику товщину 0,3–4,8 м, але характеризуються високим вмістом КСІ у сильвініті (21,3 %). Глибина залягання 600–1000 м. Прогнозні запаси оцінюють у 1 млрд т.

Абразивна сировина (гранат). В Україні відомі родовища гранату двох типів: магматичні й метаморфічні. Перші пов'язані з гранітами архей-протерозойського віку (Слобідське і Лозненське родовища, Жигалівський, Миколаївський, Гуліївський та інші прояви Волинської площі); другі приурочені до сланцево-гнейсових товщ докембрію Побузької (Заваллівське родовище, Шамраївський, Богданівський, Лозоватський прояви),

Приазовської (Драгунський, Білоцерківський, Верхньотомаський) та Криворізької (Жовтянський) площ (рис. 7).

Слобідське родовище у Вінницькій обл. сформоване біотит-гранатовими гранітами бердичівського комплексу та продуктами їхнього вивітрювання. Вміст гранату становить 14,5–16,0 %. Його склад достатньо однорідний (%): альмандин (61), піроп (31), grosular (7), спесартин (1), мікротвердість 1400–1560 кг/мм². Повна абразивна здатність щодо монокорунду досягає 45–52 %, початкова – 81–87 %. За мікротвердістю, абразивною здатністю, механічною міцністю, термостійкістю гранати родовища можуть застосовуватися для шліфування виробів з дерева, шкіри, гуми, тонкого шліфування скла і доведення деталей з м'яких металів. Супутньою корисною копалиною є кварц-польовошпатовая сировина для скляної промисловості. Родовище розвідано на глибину від 13,7 до 29,1 м, середня товщина вивітрених руд 3,5 м, щільних – 18,2 м. Запаси абразивного гранату – 673 тис. т; кварц-польовошпатової сировини – 2 053 тис. т.

Іванівське родовище у Вінницькій обл. сформовано аналогічними біотит-гранатовими гранітами. Гранат обох родовищ за фізико-механічними властивостями ідентичний. Іванівське родовище експлуатується ВАТ "Іванівський сцещкар'єр", що випускає щебінь для дорожнього будівництва. У процесі перероблення гранітів на щебінь утворюється збагачений гранатом до 19–26 % (за вмісту його в початковій руді 15–20 %) кам'яний відсів фракції менше 5 мм. З кожних 100 тис. м³ гірської маси в процесі збагачення виходить 25–30 тис. м³ відсіву, у якому міститься 7–8 тис. т гранату. Із цього відсіву можливе також отримання кварц-польовошпатових концентратів для скляної промисловості в кількості не менше 16–18 тис. т. Гранат Іванівського родовища може бути використаний для абразивної промисловості.

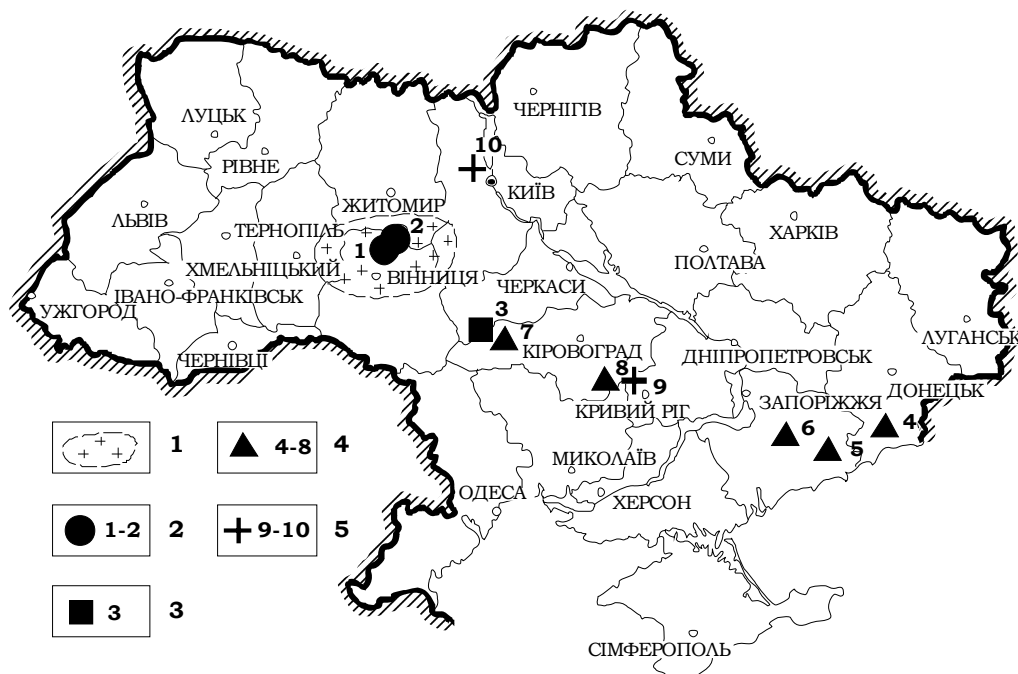


Рис. 7. Схема розташування родовищ абразивної сировини (Гурський та ін., 2006; Михайлов та ін., 2008):

1 – бердичівські граніти; 2 – родовища гранатів палеопротерозою (1 – Слобідське; 2 – Іванівське); 3 – родовища гранатів неогарно (3 – Заваллівське); 4 – корунд (4 – Східнопридніпровська ділянка; 5 – Центральноприазовська ділянка; 6 – Драгунське родовище; 7 – Середньобузький р-н; 8 – Коколовський прояв); 9 – маршаліт (родовища: Криворізьке, Гаврилівське 10)

Заваллівське родовище сформовано біотит-графітовими і біотит-гранатовими гнейсами та кварцитами. Біотит-гранатові гнейси розвинені у вигляді смуг, лінз, довжиною до 1 км, товщиною від 1–2 до 100 м, часто складної конфігурації. Вміст гранату в продуктивній товщі становить 6–31 %, у середньому – 15 %. Гранати за фізико-механічними властивостями не поступаються гранатам Слобідського родовища, гранатовий концентрат задовольняє вимоги до концентратів для виробництва шліфувальної шкіри і порошоків для шліфування скла. Запаси гранат-біотитових гнейсів досягають 18,5 млн т, гранату – 3,1 млн т.

Інші родовища мають подібну будову (Михайлов, 2023а).

Отже, в Україні є велика МСБ абразивної сировини (гранату), об'єкти якої можуть викликати зацікавленість потенційних інвесторів.

Кварцова сировина представлена родовищами кварцових пісків, які залягають у вигляді лінз і пластів (2–40 м) у відкладах бережської світи олігоцену ДДЗ і Донбасу та неогенових відкладах ВПП, континентальних четвертинних відкладах УЩ. Крім того, у Закарпатті відоме родовище ріолітів, а на УЩ і на Донбасі – прояви жильного кварцу (рис. 8). Державним балансом корисних копалин враховано 42 родовища кварцового піску (з яких 14 розробляють) із запасами 329,9 млн т й одне родовище ріоліту із запасами 20,7 млн т. У 2020 р. видобуток кварцових пісків становив 1 421,7 тис. т (Мінеральні ресурси..., 2021).

Кварцові піски пов'язані переважно із трьома епохами короутворення: палеогеновою, олігоцен-міоценовою та пліоцен-четвертинною. До найважливіших родовищ належать: Гусарівське, Авдіївське, Новоселівське, Берестовеньківське в Харківській; Великоглібовицьке і Волошинське у Львівській; Новомихайлівське в Донецькій; Папірнянське в Чернігівській обл.

Гусарівське родовище представлене грубозернистими кварцовими слабо глинистими пісками бучацької

світи палеогену, якими сформовано субгоризонтальне тіло довжиною до 3 км, товщиною від 5,0 до 24,5 м. Товщина покривних порід (тонкозернисті глинисті глауконіто-кварцові піски харківської світи) коливається від 6,3 м до 52,8 м (середня 20,9 м). Запаси кварцового піску досягають 98,6 млн т. Родовище є комплексним, піски придатні для виробництва карбіду кремнію (кварцова сировина) і як формувальні піски. Родовище відпрацьовується ВАТ "Гусарівський ГЗК".

Авдіївське родовище представлено кварцовими рівномірно-дрібнозернистими пісками полтавської світи, перекритими четвертинними суглинками і глинами (2,5–21,0 м). Виділяють п'ять шарів, з яких другий, третій і четвертий є сировиною для скляної промисловості. Вміст кварцу в них сягає 97–99,5 %, SiO_2 – 97,28; Al_2O_3 – 1,66 %; вміст Fe_2O_3 не перевищує 0,2–0,3 %. Основну масу піску сформовано з безбарвних кутастих і кутасто-обкатаних зерен кварцу. Трапляються поодинокі лусочки мусковіту, зерна калієвих польових шпатів, карбонатів, халцедону. Піски добре збагачуються флотацією і промиванням із класифікацією.

Великоглібовицьке родовище представлено дрібнозернистими світло-сірими кварцовими пісками торонського ярусу міоцену, що залягають на верхньокрейдових мергелях і перекриваються літотамнієвими вапняками та четвертинними суглинками. Довжина шару корисної копалини 800–1500 м, ширина – 350–800 м, товщина – 3,1–13,1 м, товщина розкривних порід 3,0–15,2 м. Вміст кварцу 96,05–99,7 %; SiO_2 – 94,98–99,66 %; Fe_2O_3 – 0,03–0,2 %. Об'ємна маса пісків – 1,66 г/см³, коефіцієнт розпушення – 1,30, природна вологість – 2,3–3,6 %. Піски родовища навіть без збагачення придатні для виготовлення віконного скла, вони легко збагачуються методом флотації і можуть також використовуватись як формувальні та будівельні піски. Запаси кварцових пісків на 1 січня 2021 р. становили 7 975,7 тис. т. Родовище розробляє ТОВ "Торгово-видобувна компанія «Львівський мехсклозавод»".

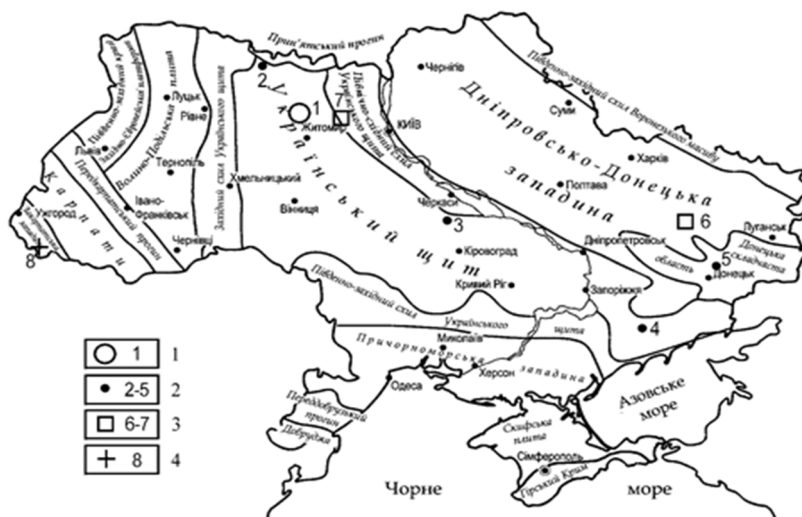


Рис. 8. Схема розташування родовищ кварцової сировини (Михайлов та ін., 2008):

1 – кварц пегматитів; 2 – кварцові жили; 3 – пісок кварцовий; 4 – ріоліт.

Цифрами позначено родовища і прояви: 1 – Волинське; 2 – Ленчинський; 3 – Арсенівський; 4 – Скляна Гора; 5 – прояви Донецького басейну; 6 – Гусарівське; 7 – Білокриницьке; Кодринське; 8 – Ардівське

Крім кварцового піску, як кварцову сировину можна використовувати ріоліти, відомі в Берегівському нагір'ї Закарпаття, де розвідане **Ардівське родовище**, сформоване ріолітами і перлітами тортону і сармату вулканічного купола Ардівського палеовулкану (рис. 9). Об'ємна насипна вага спученого перлітового "піску" в середньому

становить 150–180 кг/м³. Розробка родовища може відбуватися кар'єрним способом. Крім перлітових порід, на родовищі вивчали глини, що придатні для виробництва цегли, черепиці, пустотілих каменів, блоків. Запаси родовища досягають 9 336 тис. м³. Родовище не розробляють.

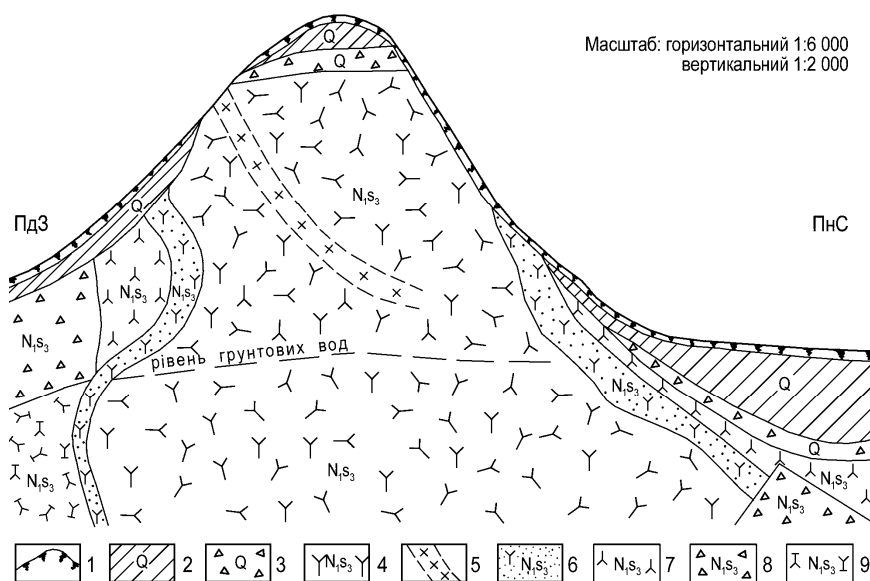


Рис. 9. Геологічний розріз Ардівського родовища (Гурський та ін., 2006):

- 1 – ґрунтово-рослинний шар; 2 – суглинки з уламками вулканітів; 3 – уламки та жорстка вулканітів; 4 – ріоліти;
5 – зони гідротермально змінених ріолітів; 6 – перехідні різновиди від ріоліту до перліту; 7 – перліт;
8 – перлітова туфобрекція; 9 – масивні перліти

Ще одним джерелом кварцової сировини може слугувати жильний кварц, прояви якого відомі в межах УЩ і Донбасу. Одним з найважливіших джерел кварцової сировини є **Волинське родовище** камерних пегматитів в Житомирській обл. (описано нижче). Прояви кварцу відомі у Приазовському (Скляна Гора), Інгульському (Арсенівський), Середньопридніпровському (Апостолівський) блоках УЩ, у Донбасі.

Сировина п'єзооптична (п'єзокварц) представлена **Волинським родовищем** у Житомирській обл., яке розміщено в палеопротерозойських габро-анортозитах і гранітах рапаків Коростенського плутону (Василишин, Панченко, & Павлишин, 1996; Яковлева, & Каменчук, 2004). Пегматити камерного типу локалізовані в західному ендоконтакті гранітів з породами основного складу й утворюють зону довжиною 22 км і шириною 0,3–1,5 км. Вони пов'язані з рапаківподібними лезниківськими гранітами, мають зональну будову, найбільший інтерес викликає внутрішня зона з вільним ростом кристалів (занориш). До неї приурочена основна маса кристалів кварцу, де вони містяться в пухкому або щільному агрегаті, сформованому з окремих кристалів, їхніх зростків, уламків кварцу і польових шпатів, зцементованих опалом, халцедоном, кварцом, глиною. Розміри кристалів різні. Поряд із дрібними індивідами зустрічаються гігантські кристали масою 10 т і більше, розміром до 2–3 м. Більшість кристалів мають зональну або зонально-секторальну будову. Кварцове ядро міститься в центральній частині пегматиту над заноришем. Форма його лінзоподібна, товщина від 1–2 до 10–15 м. Під ним розміщується занориш розміром до 5 м, об'ємом 30–40 м³. У ньому утворюються великі, чудово ограновані кристали кварцу, топазу, берилу. Головні мінерали: кварц, польові шпати, слюда, другорядні: топаз, берил, опал, халцедон, флюорит, сидерит, гідрослюди, хлорит, фенакіт, рідкісні – пірит, ільменіт, циркон, рутил, амеліт, турмалін, монацит тощо (до 96 мінералів). Родовище інтенсивно розроблювали в минулому столітті. Воно слугувало основним джерелом п'єзокварцової сировини Радянського Союзу. Зведення щодо запасів п'єзокварцової сировини є закритими. Нині спеціальний дозвіл

на геологічне вивчення з дослідно-промисловою розробкою північної частини Волинського родовища має ПАТ "Кварцсамоцвіти" (Мінеральні ресурси..., 2021).

До перспективних належать такі види неметалічних корисних копалин, що мають стратегічне значення для економіки України, як: фосфорити, апатит, плавиковий шпат, глауконіт, вапняки для цукрової промисловості, флюсові вапняки і доломіти, бентонітові глини, польово-шпатові сировина, каменебарвна сировина. Вони характеризуються середнім рівнем інвестиційної привабливості (50–69 %), середніми ризиками інвестиційних вкладень (31–50 %), низькою конкуренцією.

До видів сировини з нез'ясованими перспективами належать види неметалічних корисних копалин, що мають стратегічне значення для економіки України, а саме: барит, бор, давсоніт, бром, йод, мінеральні сорбенти, високоглиноземиста сировина, сировина для виробництва мінеральних фарб, фтор, сірка. Вони характеризуються низьким рівнем інвестиційної привабливості (< 50 %), високими ризиками інвестиційних вкладень (> 50 %), відсутністю конкуренції.

Дискусія і висновки

На основі експертної оцінки інвестиційної привабливості родовищ неметалічних корисних копалин України як найперспективніші виділено такі об'єкти (Михайлов, 2023а):

- **каолін**: Жежелівське, Глуховецьке, Турбівське, Великогадоминецьке родовища;
- **облицювальне каміння**: Сліпчицьке і Головинське родовища лабрадориту; Омелянівське, Токівське, Капустянське, Лизницьке і Корнинське родовища граніту;
- **тугоплавкі глини**: Часів-Ярське, Новорайське, Володимирівське, Пологівське;
- **графіт**: Заваллівське, Буртинське (Хмельська ділянка) родовища;
- **гранат**: Слобідське, Іванівське родовища;
- **кварцова сировина**: Гусарівське, Великоглібовицьке родовища;
- **п'єзокварц**: Волинське родовище (з проявами каменебарвної сировини);
- **фосфорити**: Жванське родовище;

• **вапняки для цукрової промисловості:** родовища Замок, Лисогірка;

• **бентоніт:** Черкаське родовище.

Саме ці родовища розглядаються як першочергові для залучення інвестицій. Подальші дослідження перспектив інвестування конкретних об'єктів МСБ неметалічної сировини України мають бути спрямовані на аналіз динаміки світового ринку; визначення напрямку, об'єктів і методів можливого ліцензування; аналіз первинних матеріалів ГРР; проведення геолого-економічної оцінки доцільності та рентабельності освоєння об'єктів.

Список використаних джерел

- Василишин, І. С., Панченко, В. І., & Павлишин, В. І. (1996). Пегматити Волині. *Мінеральні ресурси України*, 1, 2–9.
- Гурський, Д. С. (2008). Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин. ЗУКЦ.
- Гурський, Д. С., Єсипчук, К. Ю., & Калінін, В. І. та ін. (2006). *Металічні і неметалічні корисні копалини України*. Т. 2. Неметалічні корисні копалини. Центр Європи.
- Державна служба геології та надр України. (2021). *Інвестиційний атлас надкористувача: стратегічні та критичні мінерали*. <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/investicijnij-atlas-nadkoristuvacha-strategichni-ta-kritichni-minerali.pdf>
- Костенко, М. М. (2014). Мінерально-сировинна база України. Стаття 3. Стан мінерально-сировинної бази неметалічних корисних копалин України та основні напрями геологорозвідувальних робіт. *Мінеральні ресурси України*, 4, 6–13.
- Михайлов, В., Вижва, С., & Паюк, С. (2022). Системний аналіз мінерально-сировинної бази стратегічних корисних копалин України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4, 36–44.
- Михайлов, В. А., Виноградов, Г. Ф., & Курило, М. В. та ін. (2008). *Неметалічні корисні копалини України*. ВПЦ "Київський університет".
- Михайлов, В. А. (2023a). *Стратегічні корисні копалини України та їх інвестиційна привабливість*. ВПЦ "Київський університет". http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf
- Михайлов, В. А. (2023b). Високоперспективні об'єкти мінерально-сировинної бази України. Частина 1. Металічні корисні копалини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(100), 73–85. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.100.09>
- Мінеральні ресурси України. (2021). Щорічник. ДВНП "Геоінформ України". http://geoinf.kiev.ua/M_R_2021.pdf
- Рудько, Г. І., Озерко, В. М., & Шепель, І. В. (2015). *Геологія і геолого-економічна оцінка родовищ каоліну України*. Букрек.
- Яковлева, В., & Каменчук, В. (2004). Берил України. *Мінералогічний збірник*, 54(2), 189–194.
- Mykhailov, V. A., Zagnitko, V. M., & Lyzhachenko, N. M. (2021). Monitoring of graphite production in Ukraine. *15th International Scientific Conference on*

Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Kyiv, 2021.

Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., & Malyuk, B. I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. *Geological Society*. <https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133>

References

- Gurskiy, D. S., Esipchuk, K. Yu., & Kalinin, V. I. et al. (2006). *Metallic and Non-Metallic Minerals of Ukraine. Vol. II. Non-Metallic Minerals*. Center of Europe [in Ukrainian].
- Gurskiy, D. S. (2008). *Conceptual Principles of the State Mineral Resources Policy on the Use of Strategically Important Minerals for the Country's Economy*. ZUKC [in Ukrainian].
- Kostenko, M. M. (2014). Mineral and raw material base of Ukraine. Article 3. The state of the mineral and raw material base of non-metallic minerals of Ukraine and the main directions of geological exploration. *Mineral Resources of Ukraine*, 4, 6–13 [in Ukrainian].
- Mineral resources of Ukraine. (2021). *SRDE "Geoinform of Ukraine"* [in Ukrainian]. http://geoinf.kiev.ua/M_R_2021.pdf
- Mykhailov V., Vyzhva S., & Paiuk S (2022). System analysis of the mineral-raw material base of strategic minerals of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(99), 36–44 [in Ukrainian].
- Mykhailov, V. A. (2023a). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. VPC Kyiv University [in Ukrainian]. http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf
- Mykhailov, V. A. (2023b). Highly prospective object of the mineral and raw material base of Ukraine. Part 1. Metallic minerals *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(100), 73–85 [in Ukrainian].
- Mykhailov, V. A., Hrinchenko, O. V., & Malyuk, B. I. (2022). Exploration and mining perspectives of the critical elements for green technologies in Ukraine. *Geological Society*. <https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133>
- Mykhailov, V. A., Zagnitko, V. M., & Lyzhachenko, N. M. (2021). Monitoring of graphite production in Ukraine. *15th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, 2021.
- Mykhailov, V. A., Vynogradov, G. F., & Kurylo, M. V. et al. (2008). *Non-Metallic Minerals of Ukraine*. VPC Kyiv University [in Ukrainian].
- Rudko, G. I., Ozerko, V. M., & Shepel, I. V. (2015). *Geology and Geological and Economic Assessment of Kaolin Deposits in Ukraine*. Bookrek [in Ukrainian].
- State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. (2021). *Investment Atlas of Subsurface User: Strategic and Critical Minerals* [in Ukrainian]. <https://www.geo.gov.ua/wp-content/uploads/presentations/ukr/investicijnij-atlas-nadkoristuvacha-strategichni-ta-kritichni-minerali.pdf>
- Vasylyshyn, I. S., Panchenko, V. I., & Pavlyshyn, V. I. (1996). Pegmatites of Volyn. *Mineral Resources of Ukraine*, 1, 2–9 [in Ukrainian].
- Yakovleva, V., & Kamenchuk, V. (2004). Beryl of Ukraine. *Mineralogical Journal*, 54(2), 189–194 [in Ukrainian].

Отримано редакцію журналу / Received: 15.01.24

Прорецензовано / Revised: 10.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Volodymyr MYKHAILOV, DSc (Geol.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-1837-9739

e-mail: vladvam@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

HIGHLY PROSPECTIVE OBJECT OF THE MINERAL AND RAW MATERIAL BASE OF UKRAINE. PART 2. NON-METALLIC MINERALS

A brief description of highly prospective objects of the mineral-raw material base of non-metallic minerals of Ukraine is given. Based on an expert assessment of their investment attractiveness, the following types of raw materials were selected as the most prospective: kaolin (Zhezhelivske, Glukhovetske, Turbivske, Velikodomyetske deposits); facing stones (Slipchytse and Golovinske deposits of labradorite; Omelyanivske, Tokivske, Kapustianske, Lyznitske and Kornynske deposits of granite); refractory clays (Chasiv-Yarske, Novoraiske, Volodymyrivske, Pologivske); graphite (Zavallivske, Burtynske (Khmelivska section) deposits); granate (Slobidske, Ivanivske); quartz raw materials (Husarivske, Velikohlibovitske); piezoquartz (Volynske); phosphorites (Zhvanske); limestones for the sugar industry (Zamok, Lysohirka); bentonite (Cherkaske deposit). Among the non-metallic minerals of Ukraine, these deposits have the highest level of investment attractiveness, the lowest investment risks, and can be recommended as priority objects for investment in their study and industrial development. To determine the investment prospects of concrete objects, a preliminary geological and economic assessment of the feasibility and profitability of their industrial development is necessary.

Keywords: mineral raw material base, deposit, non-metallic minerals, investment attractiveness.

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

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

УДК 553.043

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.07>

Владислав ЛУКОМСЬКИЙ, асп,
ORCID ID: 0000-0003-2282-3254
e-mail: lukoma770@gmail.com

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Марія КУРИЛО, д-р геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-1411-2754
e-mail: marikurylo@meta.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ЕФЕКТИВНОЇ РОЗРОБКИ РОДОВИЩ БУДІВЕЛЬНОГО КАМЕНЮ ТА ЩЕБЕНЕВОЇ СИРОВИНИ В МЕЖАХ ПОШИРЕННЯ ЛЬОДОВИКОВИХ ВІДКЛАДІВ

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

Розглянуто доцільність комплексного освоєння родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини, що локалізовані в межах поширення гляціальних і флювіогляціальних відкладів. Досліджено розкривні породи, які містять такі відклади, як супутні корисні копалини, що використовуються як сировина у будівельній індустрії та ландшафтному дизайні. Об'єкт дослідження – це родовища гранітів та лабрадориту, що мають промислові запаси та розробляються, і в ролі розкривних порід мають потужні поклади флювіогляціальних відкладів. Під час розробки родовищ скельних порід флювіогляціальні відклади в багатьох випадках відносять до розкриву. Традиційні способи розроблення гравійно-піщаних порід зазвичай є непридатними або ускладнюють розробку, оскільки проблема виїмання розкривних флювіогляціальних відкладів найчастіше виникає не на стадії розкриття родовища, а вже в процесі його відпрацювання. Гірничо-геологічні особливості залягання флювіогляціальних і гляціальних відкладів спричиняють необхідність коригування проєктних рішень під час розробки родовищ щебеневої сировини для забезпечення стійкості бортів кар'єру і вимог промислової безпеки.

Наведено також результати вивчення геологічної будови родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини в межах льодовикових відкладів. Це родовища – Соснівське, Ярошівське, Коціївське, Богуславське (ділянка "Дешки") й Острів, а також родовище блочної сировини "Синій Камінь", де розкриті породи представлені потужними гляціальними та флювіогляціальними відкладами дніпровського кліматоліту flgP₁dp. Зафіксовано такі особливості геологічної будови в межах цих родовищ: значний діапазон змін фізико-механічних властивостей гірських порід, що входять до складу флювіогляціальних відкладів та їхнього гранулометричного складу; різноманітність умов залягання, зокрема і наявність прошарків піщано-глинистих порід; різний рівень обводненості флювіогляціальних відкладів; значна зміна якісних показників в межах одного родовища. Своєчасність і якість виявлення цих особливостей впливає на ефективність розроблення флювіогляціальних відкладів як супутньої або спільнозалягаючої корисної копалини.

Для таких запасів рекомендовано розробити та використовувати у процесі геолого-економічної оцінки параметри кондіцій на мінеральну сировину, що враховують специфічні гірничо-геологічні умови.

Ключові слова: гляціальні відклади, розкривні породи, будівельне каміння, комплексне освоєння.

Вступ

Актуальність і постановка проблеми. Актуальність і практичне значення роботи пов'язані із підвищенням ефективності розробки родовищ щебеневої сировини, що локалізовані в межах поширення флювіогляціальних відкладів. Згідно з положеннями Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України до 2030 р. щебенева сировина належить до категорії "Б" – видів мінеральної сировини, що нині видобуваються в Україні, собівартість видобутку яких забезпечує граничний економічно вигідний рівень рентабельності, розроблення ускладнюється екологічними проблемами, розвідані запаси родовищ невеликі або виснажені, нові родовища недостатньо вивчені, але потреба в таких видах сировини зумовлена розвитком промисловості (Верховна Рада України, 2011).

У стратегії майбутнього розвитку передбачається, що відбудова вимагатиме виробництва великої кількості високоякісного, високоміцного, з певними нормами лещадності щебеню та буту. Комплексне освоєння таких родовищ, разом із максимальним використанням розкривних порід як будівельної сировини, збільшить ефективність їхньої розробки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методики геолого-економічної оцінки та підрахунку запасів для родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини викладено у вітчизняних нормативних документах, зокрема Класифікації запасів і ресурсів Державного фонду надр (Про затвердження Класифікації..., 1997) та

Інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ будівельного й облицювального каменю (Про затвердження Інструкції..., 2003). Кількісну оцінку запасів родовищ щебеневої сировини періодично подають у довідкових виданнях Державної служби геології та надр України (Мінеральні ресурси України, 2020).

У публікаціях останніх років також зафіксовано проблему гірничо-технічних ускладнень у процесі розроблення порід розкриття, що містять флювіогляціальні та моренні відклади для родовищ будівельного каменю (Литвинчук, & Фролов, 2021, 2022)

Формулювання цілей статті. Завданнями пропонованого дослідження є систематизація й оцінювання гірничо-геологічних передумов комплексного освоєння родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини в межах поширення льодовикових відкладів.

Об'єктом дослідження є родовища гранітів і лабрадориту, що мають промислові запаси і розробляються. Вони перекриті потужними покладами флювіогляціальних відкладів, які в ролі розкривних порід можуть бути оцінені як спільнозалягаючі корисні копалини. За визначенням Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин, спільнозалягаючі корисні копалини – корисні копалини, що утворюють в розкривних і вмісних породах самостійні поклади, селективний видобуток і вилучення яких технологічно можливі й економічно доцільні у процесі видобутку основних корисних копалин (Про затвердження Положення..., 2006).

Встановлено, що 10–20 % кар'єрів будівельних матеріалів, що розміщені в межах дніпровських зледенінь, належать гірничим підприємствам, які розробляють піщано-гравійні родовища флювіогляціальних відкладів як корисні копалини для виробництва піску, каменю та щебню (Литвинчук та ін., 2021). Під час розроблення родовищ скельних порід флювіогляціальні відклади в багатьох випадках зараховують до розкриття, оскільки вони перекривають доступ до корисної копалини. У такому випадку традиційні способи розроблення гравійно-піщаних порід зазвичай є непридатними, оскільки проблема виїмання розкритих флювіогляціальних відкладів зазвичай виникає не на стадії розкриття родовища, а вже у процесі його відпрацювання.

У процесі оцінювання та підрахунку запасів родовищ скельних гірських порід флювіогляціальні відклади, що містяться у покриваючому шарі, зазвичай зараховують до розкриття (Lukomskyi et al., 2022, р. 606–637), тому на умови їхнього залягання і фракційний склад уваги особливо не звертають. Однак надалі, за умови розширення фронту гірничих робіт, це може привести до ускладнень під час зняття шару флювіогляціальних відкладів розкритих порід.

До особливостей залягання таких відкладів належать:

- значний діапазон змін фізико-механічних властивостей гірських порід, що входять до складу флювіогляціальних відкладів, та їхнього гранулометричного складу;
- різноманітність умов залягання, зокрема і наявність прошарків несортованих уламків магматичних і метаморфічних порід, глин, супіску, суглинку та піску;
- різний рівень обводненості флювіогляціальних відкладів;
- значна зміна якісних показників в межах одного родовища.

Своєчасність і якість виявлення цих особливостей впливають на ефективність розроблення флювіогляціальних відкладів як супутньої або спільнозалягаючої корисної копалини. Дуже важливе значення має достовірність геологічної інформації на стадії інженерно-геологічних вишукувань. Зокрема, урахування закономірностей та особливостей умов залягання відкладів у межах земельного відведення родовища, а саме фракційний склад гравійно-піщаної маси, дає змогу вже на стадії розроблення робочого проекту передбачати організаційно-технологічні заходи, що спрощують процес їхнього виїмання.

Результати

Традиційні способи розроблення флювіогляціальних відкладів, що використовуються під час їхнього видобування як корисних копалин, на родовищах скельних матеріалів у більшості випадків є малоприсадибними і навіть неможливими. Крім того, дослідники зауважують, що проблема виїмання розкритих флювіогляціальних відкладів зазвичай виникає не на стадії розкриття родовища, а вже в процесі відпрацювання кар'єру, оскільки гравійно-валунний матеріал може залягати як по всій площі відкладу, так і створювати локальні ділянки накопичення. Через це зняття шару піщано-гравійної гірничої маси є проблематичним, що ускладнюється недостатністю робочого простору та відсутністю відповідного виїмального обладнання.

Наявні проблеми під час розроблення такого типу родовищ у гірничій частині обумовлюють актуальність роботи і ті питання, які вона має розв'язати, а саме:

- визначення нових параметрів кондицій для зазначеного типу родовищ,
- методика підрахунку,
- геолого-промислове моделювання родовищ,
- геолого-економічна оцінка родовищ.

Отже, багаторічний досвід розробки гранітних родовищ із потужним розкриттям, представленим флювіогляціальними відкладами, засвідчує важливість гірничо-геологічних факторів під час вибору параметрів кондицій, підрахунку промислових запасів і вибору систем відпрацювання. Це спричиняє необхідність детального аналізу фактичного матеріалу, систематизації і встановлення типових параметрів кондицій під час геолого-економічного оцінювання родовищ такого типу.

Зведена геологічна будова родовищ будівельного каменю та щебеневої сировини в межах льодовикових відкладів. Останнім часом розробка мінеральної сировини (переважно будівельних матеріалів) дала змогу визначити нові закономірності будови осадового комплексу та навіть верхньої частини товщі кристалічного фундаменту Середнього Придніпров'я.

У межах об'єктів дослідження, а саме на родовищах щебеневої сировини, таких як Соснівське, Ярошівське, Коціївське, Богуславське (ділянка "Дешки"), Острів, а також на родовищі блочної сировини "Синій Камінь", розкриті породи представлені потужними гляціальними та флювіогляціальними відкладами дніпровського кліматоліту *fgP₁dn* (рис. 1–4 (Манюк, 2017)).

Дніпровський кліматоліт сформований льодовиковими утвореннями, що залягають на дочетвертинних відкладах і значно поширені в льодовиковій зоні. Дніпровський кліматоліт поділяють на нижньо-, середньо- та верхньодніпровський стадіали. Нижньодніпровський стадіал сформований флювіогляціальними відкладами – *fP₁dn₁*. Середньодніпровський стадіал представлений озерно-льодовиковими, моренними та флювіогляціальними відкладами, що відповідають середній і верхній пачкам "шевченківської світи" – *Ig P₁dn₂*. Розріз нижньої частини середньодніпровського кліматоліту завершують озерно-льодовикові відклади, що перекривають донну морену. Верхньодніпровський стадіал представлений крайовою мореною – *gkP₁dn₃* (Манюк, 2017).

Знімки, наведені на рис. 1–4, надають уявлення про уламки (валуни) кристалічних порід.



Рис. 1. Гравійно-валунний матеріал на Соснівському родовищі, північна частина розкритого горизонту

У межах України льодовикові та воднольодовикові відклади мають значне поширення, вони є результатом середньоплейстоценового окського та дніпровського зледеніння (табл. 1).



Рис. 2. Гравійно-валунний матеріал у межах північно-східної стінки Ярошівського родовища



Рис. 3. Валунний матеріал на Богуславському родовищі (ділянка "Дешки"), північна частина розкривного горизонту



Рис. 4. Градація за розміром валунного лабрадориту на родовищі "Синій Камінь"

Таблиця 1

Підрозділи четвертинної системи, згідно з класифікацією Міжнародної комісії зі стратиграфії
(International Commission on Stratigraphy, ICS)

Система	Відділ	Ярус	Вік, млн років тому
Четвертинна	Голоценовий	Мейгальський	0,0042–0
		Нортгріппський	0,0082–0,0042
		Гренландський	0,0117–0,0082
	Плейстоценовий	Верхній	0,129–0,0117
		Чибанський	0,774–0,129
		Калабрійський	1,80–0,774
		Гелазький	2,58–1,80

Саме льодовикові відклади та похідні від них, що сформовані з несортованих уламків магматичних і метаморфічних порід, глин, суглинків, супісків та пісків, поширені в межах давніх зледенінь (рис. 5).

Окський льодовик, що відповідає за віком льодовику Ельстерном Західної Європи, мав поширення лише в крайній північно-західній частині України.

Дніпровський льодовик, що відповідає західноєвропейському льодовику Заалій, мав поширення на значних площах території Поліської низовини, Подільської височини, Придніпровської височини та Придніпровської низовини (Ohar, 2021).



Рис. 5. Спрощена карта четвертинних льодовикових відкладів України (Galets'kyi, & Peredery, 2007):

- 1 – південна межа дніпровських зледенінь; 2 – південна межа Ельстерського (Окського) зледеніння;
- 3 – гляціодислокації (1 – Канів, 2 – Пивиха, 3 – Калитва); 4 – зона випадіння флювіогляціальних відкладів;
- 5 – територія лесових та лесовидних відкладів; 6 – ділянки, де льодовикові відклади не поширені;
- 7 – територія, що досліджується

Крайня точка поширення льодовикового язика, що є його південною межею, розташована поблизу м. Дніпро. Товщина порід льодовикового генезису змінюється від кількох метрів до 20–30 м, зрідка до 100 м. У крайовій зоні Дніпровського льодовика поширені гляціодислокації. Водно-льодовикові (флювіогляціальні) відклади (піски, галечники, супіски, суглинки, глини) залягають над і під мореною, а також утворюють своєрідні форми рельєфу (ками, ози, зандри). У міжльодовиков'я нагромаджувалися субаквальні глини, супіски, піски, торфи, загальною товщиною до 5–10 м, а за межами зледеніння – субаквальні викопні ґрунти. У перигляціальній зоні льодовика утворювались леси – своєрідний комплекс еолово-делювіальних відкладів, що мають покривний та острівний типи залягання. Лесові породи вкривають близько 70 % території України. Вони відсутні лише на більшій частині Полісся та в горах. Лесова товща перешаровується горизонтами викопних ґрунтів; її загальна товщина – від кількох до 30–50 м.

У північних регіонах України виділяють як льодовикові, так і флювіогляціальні відклади. Льодовикові відклади або тілли, складені з несортованих валунів і гальки різного складу та віку у дрібнозернистій глинистій мулової матриці. Товщина відкладів – від 0,5 до понад 18 м.

Флювіогляціальні відклади часто підстеляють і навіть перекривають тілль та створюють характерні форми рельєфу – ками, ескери та піщану рівнину. Товщина водно-льодовикових утворень коливається від перших метрів до 50 м, максимальна – 100–120 м.

Ділянки на півдні та сході від площ тіллу перекриті лесовими відкладами, у яких знаходять поховані

горизонти палеоґрунтів. Загальна товщина відкладів становить від 5 до 50 м (Ohar, 2021).

Дискусія і висновки

Зазначені гірничо-геологічні особливості залягання флювіогляціальних і гляціальних відкладів спричиняють необхідність коригування проектних рішень під час розробки родовищ щебеневої сировини для забезпечення стійкості бортів кар'єру і вимог промислової безпеки. Ці відклади, які становлять істотну частину розкривних порід, можна також розглядати як супутні (а в більш рідкісних випадках – як спільнозалягаючі корисні копалини), які можна використовувати в будівельній індустрії та в ландшафтному дизайні.

Отже, з огляду на особливості флювіогляціальних відкладів і їхні форми залягання, на прикладі розглянутих родовищ зауважимо, що ці особливості мають бути врахованими під час проведення геолого-економічних оцінок родовищ. Насамперед це стосується визначення напрямів використання такої сировини за умови її придатності, а також розроблення відповідних параметрів кондицій на мінеральну сировину (Положення про порядок..., 2006) для комплексного освоєння родовищ щебеневої сировини.

Внесок авторів: Владислав Лукомський – методологія, збір та аналіз даних, написання (оригінальна чернетка); Марія Курило – концептуалізація, методологія, написання (перегляд і редагування).

Список використаних джерел

Верховна Рада України. (2011). *Загальнодержавна програма розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року* (закон України від 21.04.2011 № 3262-VI). *Відомості Верховної Ради України*, № 44, ст. 457. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text>

Литвинчук, І. Д., & Фролов, О. О. (2022). Обґрунтування бульдозерно-екскаваторно-автомобільного комплексу для зняття розкривного шару флювіогляціальних відкладів в умовах Соснівського родовища гранітів. *Геоінженерія*, 7, 83–93. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.252758>

Литвинчук, І. Д., & Фролов, О. О. (2021). Проблеми виймання флювіогляціальних відкладів на розкривних уступах родовищ скельних будівельних порід. *Тези VIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Житомир, Житомирська політехніка* (с. 65–69).

Манюк, В. В. (2017). Про змінення положення південної границі Дніпровського (рисського) зледеніння. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Геологія. Географія*, 21, 99–110.

Мінеральні ресурси України. (2020). Державне науково-виробниче підприємство "Державний інформаційний геологічний фонд України".

Про затвердження Інструкції із застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин Державного фонду надр до родовищ будівельного й облицювального каменю. (2003). *Офіційний вісник України*, 6, 205, ст. 261, код акта 24374/2003.

Про затвердження Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр. (1997). *Офіційний вісник України*, 19, 104, код акта 700/1997.

Про затвердження Положення про порядок розробки та обґрунтування кондицій на мінеральну сировину для підрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах. (2006). *Офіційний вісник України*, 5, 137, ст. 246, код акта 35044/2006.

Galets'kyi, L. & Peredery, W. (2007). An atlas of the geology and mineral deposits of Ukraine. University of Toronto Press. <https://doi.org/10.3138/9781442684003>

Lukomskyi, V. R., Lytvynchuk, I. D., Zhukova, N. I., Beltek, M. I., & Frolov, A. A. (2022). *Establishment of regularities of fluvio-glacial deposits and problems of their extraction in the development of rock deposits of building materials*. Petrosani, Romania: "Universitas Publishin". <https://doi.org/10.31713/m1124>

Ohar, V. (2021). Carboniferous fauna from erratics in the Hradzyk area (Poltava region, Ukraine): paleo-ice streams indicator of the Dnipro glacial maximum. *Historical Biology*, 33(1), 78–87.

References

Galets'kyi, L. & Peredery, W. (2007). *An atlas of the geology and mineral deposits of Ukraine*. University of Toronto Press. <https://doi.org/10.3138/9781442684003>

Lukomskyi, V. R., Lytvynchuk, I. D., Zhukova, N. I., Beltek, M. I., & Frolov, A. A. (2022). *Establishment of regularities of fluvio-glacial deposits and problems of their extraction in the development of rock deposits of building materials*. Petrosani, Romania: "Universitas Publishin". <https://doi.org/10.31713/m1124>

Lytvynchuk, I. D., & Frolov, O. O. (2021). Problems of extraction of fluvio-glacial deposits on the overburden ledges of rocky building rock deposits. *Thesis of the VIII Ukrainian scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists, Zhytomyr, Zhytomyr Polytechnic*, pp. 65–69 [in Ukrainian].

Lytvynchuk, I. D., & Frolov, O. O. (2022). Substantiation of bulldozer-excavator-automobile complex for removal of overburden layer of fluvio-glacial deposits in the conditions of Sosnivsky granite deposit. *Geoengineering*, 7, 83–93 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/2707-2096.7.2022.252758>

Manyuk, V. V. (2017). On the change in the position of the southern boundary of the Dnieper (ris) glaciation. *Bulletin of the Dnepropetrovsk University. Series: Geology. Geography*, 21, 99–110 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15421/111724>

Mineral resources of Ukraine. (2020). *State Scientific and Production Enterprise "State Information Geological Fund of Ukraine"* [in Ukrainian].

Ohar, V. (2021). Carboniferous fauna from erratics in the Hradzyk area (Poltava region, Ukraine): paleo-ice streams indicator of the Dnipro glacial maximum. *Historical Biology*, 33(1), 78–87.

On Approval of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Fund of Subsoil. (1997). *Official Edition of Ukraine*, No. 19, p. 104, Act Code 700/1997 [in Ukrainian].

On Approval of the Instruction on the Application of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Fund of Subsoil to the Deposits of Building and Facing Stone. (2003). *Official Edition of Ukraine*, No. 6, p. 205, Article 261, Act Code 24374/2003 [in Ukrainian].

On Approval of the Regulation on the Procedure for Development and Substantiation of Mineral Resource Conditions for Estimation of Subsoil Reserves. (2006). *Official Edition of Ukraine*, No. 5, p. 137, Article 246, Act Code 35044/2006 [in Ukrainian].

Verkhovna Rada of Ukraine. (2011). National Program for the Development of the Mineral Resources Base of Ukraine for the Period up to 2030 (Law of Ukraine dated 04/21/2011 No. 3262-VI). *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*, № 44, art. 457 [in Ukrainian]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#Text> [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 28.05.24

Прорецензовано / Revised: 11.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Vladyslav LUKOMSKYI, PhD Student

ORCID ID: 0000-0003-2282-3254

e-mail: lukoma770@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Mariia KURYLO, DSc (Geol.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0002-1411-2754

e-mail: marikurylo@meta.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

GEOLOGICAL AND MINING CONDITIONS FOR THE EFFECTIVE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION AND CRUSHED STONE DEPOSITS WITHIN THE DISTRIBUTION OF GLACIAL SEDIMENTS

The study determined the feasibility of multicommodity deposits development of construction and crushed stone, which are localized within the distribution of glacial and fluvio-glacial deposits. Overburden is studied as associated minerals, used in the construction industry and landscape design. The objects of the study are deposits of granites and labradorite, which have industrial reserves and are mined, as overburden rocks have enough thickness of fluvio-glacial sediments. During the development of crystalline rock, fluvio-glacial deposits in many cases are classified as overburden. Traditional mining methods of gravel-sand rocks are usually unsuitable or complicate the development, since the problem of extracting overburden fluvio-glacial deposits, as a rule, does not exist at the stage of opening, but already in the mining process. The mining-geological features of fluvio-glacial and glacial deposits make it necessary to adjust design solutions when developing crushed stone deposits to ensure the stability of the sides of the quarry and industrial safety requirements.

There are the results of studying the geological structure of deposits of building stone and crushed stone within the boundaries of glacial deposits. These are the Sosnivske, Yaroshivske, Koshchiivske, Boguslavskе deposits, the "Deshki" area, and the Ostriv deposit, as well as in the "Synii Kamin" block raw material deposit, where overburden rocks are presented by thick glacial and fluvio-glacial layers of the flgP₁dn Dnieper climatolite. The following features of the geological structure within these deposits were fixed: 1) a significant change of the physical and mechanical properties of the rocks that make up the fluvio-glacial deposits and their granulometric composition; 2) a variety of mining conditions, including the presence of layers of sandy-clay rocks; 3) different degrees of waterlogging of fluvio-glacial deposits; 4) a significant change in quality indicators within one deposit. The timeliness and quality of the detection of these features affects the effectiveness of the development of fluvio-glacial rocks as co-occurring or by-product mineral.

For such reserves, it is recommended to develop and use cut-off parameters for mineral raw materials, which take into account specific mining and geological conditions, during geological and economic assessment.

Keywords: glacial deposits, overburden, construction and crushed stones, complex development.

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 553.045

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.08>

Станіслав ЛИТВИНЮК, канд. геол. наук

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ПЕРЕВЕДЕННЯ ТА ЗІСТАВЛЕННЯ РІЗНИХ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ОЦІНЮВАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ РЕСУРСІВ НА ПРИКЛАДІ ВІТЧИЗНЯНИХ РОДОВИЩ ГРАФІТУ ТА МІДІ

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

Вступ. Аналіз практичного застосування результатів зіставлення за групами класифікаційних ознак систем оцінювання мінеральної сировини має прикладне та методичне значення. Опрацьовані методичні підходи щодо узгодження (переведення) різних класифікаційних систем дають змогу провести актуалізацію Державного фонду надр України відповідно до критеріїв Рамкової класифікації ресурсів Організації Об'єднаних Націй (РКООН) та виділити перспективні напрями інвестування в різні стадії надрокористування.

Методи. З урахуванням досвіду та результатів проведення державної експертизи матеріалів геолого-економічної оцінки запасів і ресурсів графіту і міді, було використано широкий комплекс досліджень, що охоплював загальнонаукові та спеціальні методи наукових і прикладних досліджень. Окрім загальнотеоретичних методів аналізу, статистики та систематизації, для досягнення постановленої мети використано комплекс методів геолого-промислової характеристики родовищ графіту й міді.

Результати. Проаналізовано категорії запасів і ресурсів найпоширеніших класифікаційних систем, що мають достовірний рівень зіставлення та гармонізації. Виконано узгодження (переведення) та порівняння різних класифікаційних систем оцінювання мінеральних ресурсів на прикладі вітчизняних родовищ з переліку критичної мінеральної сировини Європейського Союзу – графіту та міді. Результати досліджень націлені на створення уніфікованої класифікаційної системи для зацікавлених сторін (держава, інвестор, суспільство) з метою ухвалення рішень у сфері управління ресурсами на всіх рівнях.

Висновки. Викладені методичні дослідження створення уніфікованих підходів до оцінювання запасів і ресурсів, облікованих Державним балансом, дають можливість на початкових стадіях визначати інвестиційний потенціал ділянок надр, не залучених до використання.

Запропонований механізм приведення у відповідність нерозподіленого фонду надр передбачає узгодження облікових запасів з різними класифікаційними системами за трьома критеріями РКООН: визначення рівня геологічного вивчення, з'ясування рівня техніко-економічного вивчення, за промисловим значенням.

Ключові слова: облік, мінеральна сировина, Рамкова класифікація ресурсів ООН, категорії, класифікаційні ознаки.

Вступ

Розроблення уніфікованих підходів оцінки та класифікації запасів і ресурсів корисних копалин або гірничодобувних проєктів у наш час є дуже актуальним. Практичне значення теоретичних і методичних розробок з окресленого питання полягає у створенні єдиних інструментів та алгоритмів класифікації, обліку й управління об'єктами, що використовують мінеральну сировину. В Україні відповідно до законодавства запроваджено системний облік мінерально-сировинних ресурсів. Облік об'єктів (ділянки надр, родовища, рудопрояви тощо) Державного фонду надр України містить інформацію Державного кадастру родовищ і проявів корисних копалин та Державного балансу запасів корисних копалин (далі – Державний баланс), оцінку яких здійснено в різні роки за стандартами, що були чинними на момент оцінювання (Верховна Рада України, 1994). Результати оцінювання відображені у протоколах Центральної, а згодом Всесоюзної комісії по запасах корисних копалин (ЦКЗ та ВКЗ) 1930-х та 1940-х рр., Державної комісії по запасах корисних копалин СРСР (ДКЗ СРСР) 1950–1980-х та 1980–1991-х рр. Крім протоколів ЦКЗ, ВКЗ та ДКЗ, результати геологорозвідувальних робіт та оцінки враховувались Державним балансом запасів корисних копалин згідно з відомчими протоколами науково-технічних рад (НТР та ЕТР) профільних організацій і підприємств. Оцінка мінеральної сировини попередніх років не відповідає базовим класифікаційним критеріям Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр України (далі – Класифікація) та РКООН, які широко застосовують вимоги до економічної, соціальної й екологічної ефективності використання мінеральної сировини (Кабінет Міністрів України, 1997).

Огляд останніх досліджень і публікацій та формулювання цілей статті. Аналітична характеристика Державного балансу запасів корисних копалин України, його ресурсно-інвестиційний потенціал, механізми обліку викладені з достатнім рівнем обґрунтованості в багатьох працях і публікаціях (Мінеральні ресурси України, 2021; Балега, Вижва, & Курило, 2018; Рудько та ін., 2012; Вижва, Курило, & Балега, 2018).

Методичні аспекти застосування різних класифікаційних систем, їхні особливості та характеристика відображені в монографіях та працях (Рудько та ін., 2012; Литвинюк, & Курило, 2023; Литвинюк та ін., 2023).

Методичні розробки з актуалізації Державного балансу запасів корисних копалин України розпочаті Державною комісією України по запасах корисних копалин (Державна комісія України..., 2021).

Україна залишається у значній мірі видобувною (ресурсною) державою. Значну частку її мінерально-сировинної бази **сформовано з ділянок надр, що залучені до промислового освоєння, а також ділянок, які перебувають на різних стадіях геологічного вивчення й освоєння.** Нині застосування європейських стандартів оцінки та класифікації вітчизняних об'єктів може надати актуальну інформацію щодо їхнього інвестиційного потенціалу.

Значна кількість публікацій і нормативних документів, що систематизують вимоги й особливості проведення оцінювання на різних стадіях геологічного і техніко-економічного вивчення, мають наближений та описовий аналіз класифікаційних систем і методичних прийомів узгодження та зіставлення соціально-економічних, технологічних та геологічних категорій запасів і ресурсів мінеральної сировини.

© Литвинюк Станіслав, 2024

З урахуванням унесення змін до Кодексу про надра (Верховна Рада України, 1994), що надають можливість під час здійснення державної експертизи й оцінки металічних і неметалічних запасів та ресурсів використовувати класифікаційні системи РКООН, Комітету з міжнародних стандартів звітності по запасах твердих корисних копалин (CRIRSCO) й інші міжнародні стандарти, залишається неопрацьованим питання зіставлення на детальному рівні зазначених класифікаційних систем.

За даними Державного балансу України обліковано близько 9200 родовищ, з них майже 5200 обліковано відповідно до вимог класифікаційних систем, якщо і втратили чинність і не враховують економічно-соціальних й екологічних аспектів промислової експлуатації мінеральних ресурсів і потребують інвестицій для подальшого освоєння.

Метою пропонованого дослідження є застосування методики узгодження (переведення) та зіставлення різних класифікаційних систем оцінювання мінеральних ресурсів на прикладі вітчизняних родовищ з переліку критичної мінеральної сировини Європейського Союзу – графіту та міді.

Інший напрямок досліджень націлений на узгодження класифікаційних ознак РКООН і CRIRSCO з метою отримання оперативної інформації для управління ресурсами й інвестиційного аналізу родовищ (ділянок надр) твердих (металічних і неметалічних) корисних копалин.

Методи

Методичні засади переведення та зіставлення категорій запасів, що обліковані Державним балансом за різними класифікаційними системами. Відповідно до чинного законодавства в Україні існує системний облік запасів і ресурсів усіх видів корисних копалин. Державний баланс відображає систему збору, обробки та зберігання даних геологорозвідувальних і гірничодобувних робіт різних років. Облік запасів корисних копалин у Державному балансі має здійснюватися згідно з Класифікацією, що узгоджується з категоріями РКООН. Як було зазначено вище, значну частину облікованих об'єктів у балансі здійснено на підставі протоколів ДКЗ СРСР, УкрТКЗ і відомчих НТР. Оцінювання цих об'єктів проведено за класифікаційними системами 1981, 1960 та більш ранніх років.

З метою встановлення уніфікованих даних про запаси та ресурси корисних копалин, що підраховані за різними класифікаційними системами в різні роки і враховані Державним балансом, автором запропоновано покроковий алгоритм узгодження (гармонізації) класифікаційних ознак (умов) систем 1981 та 1960 рр. з іншими класифікаційними системами.

Методика переведення та гармонізації відбувається за критеріями (умовами), що відповідають вимогам достовірності геологічного вивчення (вісь G), техніко-економічного (технологічного) вивчення родовища (вісь F) й екологічного, соціально-економічного значення (вісь E).

Вісь G. Категорії осі G відображають рівень вивченості речовинного складу, кількісних і якісних характеристик, геологічної будови, гідрогеологічних, гірничо-геологічних й інших умов залягання запасів і ресурсів корисних копалин покладів, а також можливості застосування цих відомостей для обґрунтування проектних рішень щодо способу й системи видобування та схеми комплексної переробки. Критерії (умови) переведення або зіставлення за категоріями відповідають:

G1 – детально розвідані запаси родовищ і ділянок, затверджені ДКЗ СРСР, УкрТКЗ або ДКЗ, що відповідно до прийнятих постійних кондицій мали промислове значення;

G2 – детально і попередньо розвідані запаси родовищ і ділянок, затверджені ДКЗ СРСР, УкрТКЗ або ДКЗ, що відповідно до прийнятих тимчасових кондицій мають промислове значення, але потребують довивчення;

G3 – попередньо розвідані запаси корисних копалин на стадіях пошукових і пошуково-оцінювальних робіт, що враховуються в балансі або кадастрі, які не проходили затвердження в ДКЗ СРСР, УкрТКЗ, ДКЗ.

Вісь F. Категорії осі F відображають рівень вивченості проектних рішень, технологічних, гірничо-технічних, географо-економічних й інших умов розробки родовищ корисних копалин і переробки. Критерії (умови) переведення або зіставлення за категоріями відповідають:

F2 – запаси родовищ і ділянок, затверджені ДКЗ СРСР, ТКЗ або ДКЗ України за Класифікацією СРСР 1981 р. та 1960 р. і визнані на підставі проектних та технологічних досліджень такими, що підготовлені до промислової розробки;

F3 – запаси родовищ і ділянок, затверджені ВКЗ, ДКЗ СРСР, ТКЗ або ДКЗ України за більш старими ніж Класифікація СРСР 1960 р. і визнані на підставі проектних і технологічних досліджень такими, що підготовлені до промислової розробки;

F3 – запаси корисних копалин, що враховуються в балансі або кадастром, затверджені ВКЗ, ДКЗ СРСР, ТКЗ або ДКЗ України і визнані як розвідані, або перспективні для розвідки ділянки. Інші запаси і ресурси корисних копалин, що враховуються в балансі або кадастром, зокрема і залишок раніше експлуатованих родовищ і ділянок, якщо він у майбутньому може бути залучений у промислове освоєння незалежно від інстанції їхнього затвердження;

F4 – запаси і ресурси корисних копалин, зокрема і залишок запасів раніше експлуатованих родовищ та ділянок, які обґрунтовано віднесені на підставі проектних чи технологічних досліджень до таких, що не можуть бути видобуті сучасними методами розробки або веденням гірничих робіт і залишаються у надрах (in situ) на місці залягання незалежно від інстанції, що їх затверджувала.

Вісь E. Достовірність визначення промислового значення категорій осі E і віднесення запасів корисних копалин до балансових, умовно балансових, позабалансових та з невизначеним промисловим значенням залежить від економічних, соціально-екологічних й інших умов розробки родовища корисних копалин. Критерії (умови) переведення або зіставлення за категоріями відповідають:

E2 – балансові запаси родовищ і ділянок, затверджені ДКЗ СРСР, ТКЗ або ДКЗ України за Класифікацією СРСР 1960 р. та 1981 р. і визнані такими, що підготовлені до промислової розробки;

E3 – позабалансові запаси родовищ і ділянок, затверджені ДКЗ СРСР, ТКЗ або ДКЗ за Класифікацією СРСР 1960 р. та 1981 р. Запаси родовищ і ділянок затверджені ВКЗ, ДКЗ СРСР, ТКЗ, або старішими ДКЗ, ніж Класифікація СРСР 1960 р. Інші запаси і ресурси корисних копалин, що враховані в балансі або кадастром (зокрема залишок раніше експлуатованих родовищ і ділянок) незалежно від інстанції їхнього затвердження. А також балансові і позабалансові запаси вільних ділянок, які визнані недоцільними для розроблення, та запаси закритих гірничодобувних підприємств.

Запропоноване зіставлення категорій і класів різних класифікаційних систем базується на документах ЄЕК ООН і методичних розробках автора (UNECE, 2015; Державна комісія України..., 2017). Аналогічно до методичних засад щодо переведення категорій запасів, облікованих Державним балансом, зіставлення виконане за геологічними, гірничо-технологічними, екологічними та соціально-

економічними ознаками (табл. 1–3), що мають відповідні характеристики у класифікаційних системах РКООН, CRIRSCO та Класифікації країн СНД (в основі Класифікація СРСР 1981 р.).

РКООН є класифікаційною системою, у якій прямо відображені класифікаційні ознаки всіх груп: економічної і соціальної життєздатності проекту (вісь E); статусу й обґрунтованості проекту освоєння родовища (вісь F); геологічної вивченості (вісь G) з використанням цифрової системи кодів. Комбінації цих критеріїв створюють тривимірну систему кодів (UNECE, 2019).

Шаблон CRIRSCO за групами класифікаційних ознак розподіляється на дві групи: достовірність геологічного

вивчення категорій ресурсів (inferred, indicated, measured) та групи, що об'єднує гірничо-технологічні та соціально-економічні ознаки ("модифікуючі фактори") категорій запасів (probable, proved) (CRIRSCO, 2019).

Класифікація СРСР розподіляється за геологічними ознаками на розвідані (A, B, C₁), попередньо розвідані (C₂) запаси та прогностичні й перспективні ресурси (P₁, P₂, P₃). Соціально-економічні ознаки корелюються з розподілом на балансові та позабалансові запаси. Гірничі, проектні та технологічні ознаки враховують під час техніко-економічного обґрунтування параметрів кондицій на мінеральну сировину.

Таблиця 1

Зіставлення класифікаційних систем за геологічними ознаками

РКООН	CRIRSCO		Класифікація СРСР
	Ресурси	запаси	
G1	Measured	Proved	A, B, C ₁
G2	Indicated	Probable	C ₂ (іноді C ₁)
G3	Inferred	–	P ₁ (іноді C ₂)
G4	Exploration Target	–	P ₂ (P ₃)

Таблиця 2

Зіставлення класифікаційних систем за гірничо-технологічними ознаками

UNFC	CRIRSCO		Класифікація СРСР (частково)
	Ресурси	Запаси	
F1	–	Proved feasibility study	ТЕО постійних кондицій
F2	Measured indicated inferred	Probable pre-feasibility study	ТЕО тимчасових кондицій
F3	Exploration Target	scoping study	Геологорозвідувальні кондиції
F4	Exploration Target	–	

Таблиця 3

Зіставлення класифікаційних систем за соціально-економічними ознаками

РКООН	CRIRSCO		Класифікація СРСР
	Ресурси	Запаси	
E1	–	Proved	Балансові запаси категорій A, B, C ₁
		Probable	Балансові запаси категорій A, B, C ₁ (іноді C ₂)
E2	Measured	–	Позабалансові запаси категорій A, B, C ₁
	Indicated		Позабалансові запаси категорій C ₂ (іноді C ₁)
E3	Exploration Target	–	Прогностичні ресурси P ₁ , P ₂ (P ₃)

Результати

Узгодження та зіставлення категорій запасів і ресурсів родовищ графітових руд, що обліковані Державним балансом. За кількістю родовищ і виявленими запасами природного (кристалічного) графіту Україна посідає одне із чільних місць у світі. Родовища кристалічного графіту утворюють Українську графітоносну провінцію, до якої входять чотири графітоносних регіони. Усього на території провінції виявлено близько 100 проявів графіту (Мінеральні ресурси України, 2021).

В Україні станом на 1 січня 2021 р. враховано шість родовищ графіту. Балансові запаси графітових руд і графіту враховані Державним балансом за категоріями геологічної вивченості A+B+C₁ у кількості 230 245,2 тис. т руди (13 755,2 тис. т графіту), C₂ – 101 341,7 тис. т руди (5556,9 тис. т графіту), позабалансові запаси за категоріями геологічної вивченості A+B+C₁ – 11 710,6 тис. т руди (362,0 тис. т графіту), умовно балансові (поза межами проектного кар'єру – 15 561 тис. т руди, графіту – 1067 тис. т).

У наш час ПАТ "Заваллівський графітовий комбінат" розробляє Південно-Східну ділянку Заваллівського родовища, ТОВ "Розвиток Побужжя" – Південну ділянку Балахівського родовища.

З урахуванням методичних засад узгодження та зіставлення, а також гармонізаційних документів, виконано

порівняння основних категорій, класів графітових руд, що обліковані за різними класифікаційними системами за відповідними умовами (табл. 4, 5).

Узгодження та зіставлення категорій запасів і ресурсів родовищ міді, що обліковані Державним балансом. На території України виявлено понад 150 мідних рудопроявів. Зруденіння міді представлені мідно-колчедановими, мідно-порфіровими та сульфідними мідно-нікелевими (Український щит) типами руд, "мідистими" пісковиками (Передкарпатський крайовий прогин та Донецька складчаста споруда), самородною міддю у траповій формації Волино-Подільської металогенічної провінції. Розміри рудопроявів зазвичай не досягають промислових значень. Найперспективнішими є Волинський рудний район (північна частина Волино-Подільської плити).

Державним балансом запасів корисних копалин України враховані запаси двох родовищ: руд міді родовища Жиричі та сульфідно-мідно-нікелевих руд рудопрояву Прутівський. Станом на 1 січня 2021 р. запаси за категорією геологічного вивчення становлять: C₂ – 34 883,1 тис. т; зокрема Cu (металу) – 101,3 тис. т; з невизначеним промисловим значенням – 20 447,3 тис. т, зокрема Cu (металу) – 20,78 тис. т.

Автором під час виконання досліджень використані дані щодо об'єктів відповідно до обліку в Державному балансі. Однак існує й альтернативна думка на оцінку

інвестиційного потенціалу Волинського міднорудного району і окремих його об'єктів (Михайлов, 2023; Михайлов та ін., 2022, 2024; Mikhailov et al., 2023). Після детального вивчення матеріалів геологорозвідувальних робіт території району дослідники дійшли до висновку, що оцінка ресурсного потенціалу рудного району значно перебільшена (більш ніж на порядок), більшість проявів міді не мають промислового значення, а ті, що можуть викликати певний інтерес (Жиричи, Заліси – Шменьки), характеризуються незначними параметрами рудних тіл, їхньою розпорошеністю по площі і розрізу, невеликим

вмістом міді, необхідністю підземного способу видобутку, що зумовлює економічну недоцільність їхньої розробки. Отже, інвестиційний потенціал Волинського міднорудного району був оцінений як незначний, що пов'язано з великими ризиками інвестиційних вкладень.

Використовуючи зазначені методичні засади узгодження та зіставлення, виконано порівняння основних категорій, класів покладів міді, що обліковані за різними класифікаційними системами за відповідними умовами (табл. 6, 7).

Таблиця 4

Узгодження та зіставлення категорій запасів і ресурсів родовищ графітових руд, що обліковані Державним балансом

№	Ділянка надр / родовище	Відомості попереднього обліку в Державному балансі	Достовірність визначення промислового значення (Вісь Е)	Достовірність визначення технологічної ефективності (Вісь F)	Достовірність визначення рівня вивчення (Вісь G)	Результати застосування методики переведення та пропозиція щодо обліку	
						Код класу	РКООН
1	Маріупольське	A+B+C ₁ : 3440 C ₂ : 1347 Цілик: A+B+C ₁ : 684 C ₂ : 242	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 201 (1954 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, часткова експлуатація, не розробляється	331:3440 332:1347 Цілик: 331:684 332:242	Перспективні проекти
2	Троїцьке	A+B+C ₁ : 2027 C ₂ : 252	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 32501 (1960 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	331:2027 332:252	Перспективні проекти
3	Заваллівське (Південно-Східна ділянка)	111/B+C ₁ : 7712 211/B+C ₁ : 15561	Запаси затверджені протоколом ДКЗ України № 4355 (2018 р.)	Визнані протоколом ДКЗ України підготовленими до подальшої промислової розробки	Детальна розвідка, розробляється	111:7712 211:15561	Життєздатні проекти
3.1	Заваллівське (Зарічна ділянка)	A+B+C ₁ : 18950 C ₂ : 14613	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 11046 (1991 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	221: 18950 222: 14613	Потенційно життєздатні проекти
3.2	Заваллівське (Хутір Андріївка)	A+B+C ₁ : 6305	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 9100 (1982 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	221: 6305	Потенційно життєздатні проекти
3.3	Заваллівське (Проміжна ділянка)	A+B+C ₁ : 37116 Цілик: A+B+C ₁ : 4185	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 9100 (1982 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	221: 37116 Цілик: 331: 4185	Потенційно життєздатні проекти
3.4	Заваллівське (Південна смуга)	A+B+C ₁ : 5028	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 9100 (1982 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	221: 5028	Потенційно життєздатні проекти
3.5	Заваллівське (Правобережна ділянка)	A+B+C ₁ : 5177	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 9100 (1982 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	221: 5177	Потенційно життєздатні проекти
4	Балахівське	111/B+C ₁ : 22297 122/C ₂ : 20356 331+332/ C ₁ +C ₂ : 26328	Запаси графітової руди затверджені протоколом ДКЗ України № 5420 (2021 р.)	Визнані протоколом ДКЗ України підготовленими до подальшої промислової розробки	Детальна розвідка, розробляється	111: 22297 122: 20356 331+332: 26328	Життєздатні проекти
5	Петрівське	A+B+C ₁ : 7523 C ₂ : 1696	Запаси затверджені протоколом ДКЗ СРСР № 2156 (1958 р.)	Визнані протоколом ДКЗ СРСР підготовленими до промислової розробки	Детальна розвідка, не розробляється	331: 7523 332: 1696	Перспективні проекти
6	Буртинське (Городнявська ділянка)	111/B+C ₁ : 113390 122/C ₂ : 16586	Запаси графітової руди затверджені протоколом ДКЗ України № 915 (2004 р.)	Визнані протоколом ДКЗ України підготовленими до подальшої промислової розробки	Детальна розвідка, розробляється	111: 113390 122: 16586	Життєздатні проекти

Примітка. Одиниці виміру: руда, тис. т

Таблиця 5

Узгодження та зіставлення категорій запасів і ресурсів родовищ графітових руд із класифікаційними таксонами шаблону CRIRSCO

№	Ділянка надр / родовище	РКООН	Код класу	CRIRSCO (за умови збереження кернавого матеріалу)
1	Маріупольське	Перспективні проекти	331:3440 332:1347 Цілик: 331:684 332:242	Exploration Target (частина 331 – Indicated)
2	Троїцьке	Перспективні проекти	331:2027 332:252	Exploration Target (частина 331 - Inferred)
3	Заваллівське (Південно-Східна ділянка)	Життєздатні проекти	111:7712 211:15561	Measured (Proved): 7712 Indicated (Probable): 15561
3.1	Заваллівське (Зарічна ділянка)	Потенційно життєздатні проекти	221:18950 222:14613	Measured+Indicated: 18950 Indicated+Inferred: 14613
3.2	Заваллівське (Хутір Андріївка)	Потенційно життєздатні проекти	221:6305	Measured+Indicated: 6305
3.3	Заваллівське (Проміжна ділянка)	Потенційно життєздатні проекти	221:37116 Цілик: 331:4185	Measured+Indicated: 37116
3.4	Заваллівське (Південна смуга)	Потенційно життєздатні проекти	221:5028	Measured+Indicated: 5028
3.5	Заваллівське (Правобережна ділянка)	Потенційно життєздатні проекти	221:5177	Measured+Indicated: 5177
4	Балахівське	Життєздатні проекти	111:22297 122:20356 331+332:26328	Indicated (Probable): 22297 Indicated+Inferred: 20356 Inferred: 26328
5	Петрівське	Перспективні проекти	331:7523 332:1696	Exploration Target (частина 331 - Indicated): 7523 (частина 332 - Inferred): 1696
6	Буртинське (Городнявська ділянка)	Життєздатні проекти	111:113390 122:16586	Measured+Indicated: 113390 Indicated+Inferred: 16586

Примітка. Одиниці виміру: руда, тис. т

Таблиця 6

Узгодження та зіставлення категорій запасів та ресурсів родовищ міді, які обліковані Державним балансом

№	Ділянка надр / родовище	Відомості попереднього обліку в Державному балансі	Достовірність визначення промислового значення (Вісь Е)	Достовірність визначення технологічної ефективності (Вісь F)	Достовірність визначення рівня вивчення (Вісь G)	Результати застосування методики переведення та пропозиція щодо обліку	
						Код класу: запаси і ресурси	РКООН
1	Прутівський рудопроєкт	C ₂ : 14395 P ₁ : 21900	Запаси апробовані протоколом ДКЗ України № 5160 (2020 р)	Визнані протоколом ДКЗ України підготовленими до подальшого геологічного вивчення	Пошуково-оцінювальні роботи, не розробляється	222:14395 333:21900	Потенційно життєздатні проекти
2	Жиричі	C ₂ : 20488 P ₁ +P ₂ : 25835	Запаси апробовані протоколом ДКЗ України № 3769 (2016 р)	Визнані протоколом ДКЗ України підготовленими до подальшого геологічного вивчення	Пошуково-оцінювальні роботи, не розробляється	222:20488 333+334:25835	Потенційно життєздатні проекти
3	Заліси – Шменьки	P ₂ : 659*	НТР Державної служби геології та надр України	Визнані протоколом НТР підготовленими до подальшого геологічного вивчення	Пошукові роботи, не розробляється	334:659	Перспективні проекти
4	Південно-Рафалівський	C ₂ : 161* P ₁ : 513*	НТР Державної служби геології та надр України	Визнані протоколом НТР підготовленими до подальшого геологічного вивчення	Пошукові роботи, не розробляється	332:161 333:513	Перспективні проекти
5	Північно-Гірницьке	P ₂ : 1315*	НТР Державної служби геології та надр України	Визнані протоколом НТР підготовленими до подальшого геологічного вивчення	Пошукові роботи, не розробляється	334:1315	Перспективні проекти

Примітки. Одиниці виміру: руда, тис. т; * тис. т (метал, Cu).

Таблиця 7

Узгодження та зіставлення категорій запасів і ресурсів родовищ міді з класифікаційними таксонами шаблону CRIRSCO

Ділянка надр / родовище	РКООН	Код класу	CRIRSCO (за умови збереження корового матеріалу)
Прутівський рудопрояр	Потенційно життєздатні проекти	222:14395 333:21900	Inferred: 14395 Exploration Target
Жиричі	Потенційно життєздатні проекти	222:20488 333+334:25835	Inferred: 20488 Exploration Target: 25835
Заліси – Шменьки	Перспективні проекти	334:659	Exploration Target
Південно-Рафалівський	Перспективні проекти	332:161 333:513	Exploration Target
Північно-Гірницьке	Перспективні проекти	334:1315	Exploration Target

Примітка. Одиниці виміру: руда, тис. т

Дискусія і висновки

Викладені методичні дослідження створення уніфікованих підходів до оцінювання запасів і ресурсів, що обліковані Державним балансом, дають можливість на початкових стадіях визначати інвестиційний потенціал ділянок надр, не залучених до використання.

Запропонований механізм приведення у відповідність нерозподіленого фонду надр передбачає узгодження облікованих запасів з різними класифікаційними системами за трьома критеріями РКООН: визначення рівня геологічного вивчення (вісь G); з'ясування рівня техніко-економічного вивчення (вісь F); за промисловим значенням (вісь E).

Опрацювання методичних засад переведення та зіставлення категорій запасів, що обліковані Державним балансом, виконано за головними категоріями (класи, групи) різних класифікаційних систем, що дає змогу виділити й охарактеризувати базові ознаки категорій, які мають достатній рівень зіставлення та гармонізації. Організаційна та технологічна подібність геологорозвідувальних стадій у процесі використання надр обумовлюють можливість зіставлення класів мінеральних ресурсів і запасів, ідентифікованих за тривимірними кодами, що застосовуються РКООН і класифікацією України, із категоріями запасів корисних копалин, оцінених згідно із Шаблоном CRIRSCO.

Як приклад практичного застосування запропонованої методики переведення та зіставлення облікованих запасів і ресурсів мінеральної сировини, оціненої за різними класифікаційними системами, наведено аналіз вітчизняних родовищ з переліку критичної мінеральної сировини Європейського Союзу – графіту та міді.

Аналіз Державного балансу родовищ графіту та міді, з використанням підходів РКООН, виявив головні перспективи розвитку мінерально-сировинної бази цих корисних копалин, що пов'язані з життєздатними, потенційно життєздатними та перспективними проектами. Більшість проаналізованих об'єктів належить до потенційно життєздатних і перспективних проектів, що потребує додаткових геологорозвідувальних робіт пошуково-оцінювальних і детальних стадій. Частина облікованих об'єктів потребує перевірки соціальних, екологічних і гірничо-геологічних даних на наявність забудов (житлових, промислових), природно-заповідних зон й інших умов, що унеможливають натеper проведення геологічного вивчення та промислової розробки (клас нежиттєздатних проектів).

Результати досліджень щодо зіставлення та гармонізації різних класифікаційних систем на прикладі родовищ графіту й міді покликані запропонувати уніфіковані та стандартизовані критерії методичних підходів, як інструментарій для актуалізації Державного балансу й інвестиційного аналізу облікованих ділянок надр твердих (металічних і неметалічних) корисних копалин.

Список використаних джерел

- Балега, А., Вихва, С., & Курило, М. (2018). Інституційне забезпечення геологічного вивчення надр: національний вимір (практика) та міжнародний досвід. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(83), 63–72.
- Вихва, С. А., Курило, М. М., & Балега, А. В. (2018). Регіональні аспекти розвитку й відтворення вітчизняної мінерально-сировинної бази та способи їхнього фінансового забезпечення. *Мінеральні ресурси України*, 4, 12–17.
- Кабінет Міністрів України. (1997). Класифікація запасів і ресурсів корисних копалин Державного фонду надр (постанова Кабінету Міністрів України від 05.05.97 № 432). *Офіційний вісник України*, 19, 104.
- Верховна Рада України. (1994). Кодекс України "Про надра" (постанова від 27.07.1994 р. № 133/94. *Відомості Верховної Ради України*, 36, 340.
- Литвинюк, С., Курило, М., Віршило, І., & Братах, М. (2023). Базові ознаки класифікаційних систем як інструмент управління та інвестиційного аналізу проектів надрокористування. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(102), 63–72. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.102.08>
- Литвинюк, С., & Курило, М. (2023). Уніфіковані критерії класифікаційних систем як інструмент управління мінеральними ресурсами. *Мінеральні ресурси України*, 4, 21–26. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.4.21-26>
- Михайлов, В. А. (2023). *Стратегічні корисні копалини України та їх інвестиційна привабливість*. ВПЦ "Київський університет". http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf
- Михайлов, В., Курило, М., Андреева, О., & Шнюков, С. (2022). Перспективи промислової рудності прояву міді Жиричі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(97), 66–73. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.97.09>
- Мінеральні ресурси України. (2021). *Інформаційний ресурс*. <http://minerals-ua.info>
- Державна комісія України по запасах корисних копалин. (2017). *Методичні вказівки щодо застосування Класифікаційної Системи шаблону Комітету з міжнародних стандартів звітності про запаси корисних копалин ("CRIRSCO") до геолого-економічної оцінки запасів і ресурсів родовищ твердих горючих та рудних корисних копалин, що подаються на державну експертизу і оцінку*. <https://www.dkz.gov.ua/ua/diyalnist/normativno-pravova-baza>
- Державна комісія України по запасах корисних копалин. (2021). *Методичні рекомендації щодо приведення запасів об'єктів, що обліковуються в Державному балансі запасів корисних копалин України, які не розробляються, у відповідність до вимог Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр* (постанова Кабінету Міністрів України від 05.05.1997 № 432 (зі змінами)). https://www.dkz.gov.ua/files/Methodichni%C3%AD_rekomendatsiya_perevoda_zapasa_persha_redakts%C3%ADya_2_redaction.pdf
- Рудько, Г. І., Нецький, О. В., Назаренко, М. В., & Хоменко, С. А. (2012). *Національні та міжнародні системи класифікації запасів і ресурсів корисних копалин: стан та перспективи гармонізації*. Букрек.
- CRIRSCO. (2019). *International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration results, mineral resources and mineral reserves*. The CRIRSCO International Reporting Template. <https://www.crirSCO.com/template/>
- Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskyi, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. BRGM.
- UNECE. (2015, May 15). *Bridging Document between the Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO) Template and the United Nations Framework Classification for Resources (UNFC)*. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf
- UNECE. (2019). *United Nations Framework Classification for Resources*. UNECE Energy Series, No. 61. https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/UNFC_ES61_Update_2019.pdf

References

- Balega, A., Vyzhva, S., Kurylo, M. (2018). Institutional support of geological study of the subsurface: national dimension (practice) and international experience. *Vysnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (83), 63-72 [in Ukrainian].

Cabinet of Ministers of Ukraine. (1997). Classification of reserves and resources of minerals of the State Fund of Subsoil (approved by the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine № 432 of 05.05.97). *Official Gazette of Ukraine*, 19, 104 [in Ukrainian].

CRIRSCO. (2019). *International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration results, mineral resources and mineral reserves*. The CRIRSCO International Reporting Template. <https://www.crisco.com/template>

Lytvyniuk, S., & Kurylo, M. (2023). Unified criteria of classification systems as a tool for mineral resources management. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 21–26 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.4.21-26>

Lytvyniuk, S., Kurylo, M., Virshilo, I., & Bratakh, M. (2023). Basic classification systems features as a tool for management and investment analysis of subsoil use projects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(102), 63–72 [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.08>

Mineral resources of Ukraine. (2021). *Information resource* [in Ukrainian]. <http://minerals-ua.info/>

Mykhailov, V. A. (2023). Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness. PPC "University of Kyiv" [in Ukrainian]. http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf

Mykhailov, V., Kurylo, M., Andreeva, O., & Shnyukov, S. (2022). Prospects of industrial ore-bearing of Zhyrychi ore occurrence. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(97), 66–73 [in Ukrainian]. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.09>

Mykhailov, V., Malyuk, B., Bovsunivskiy, P., Kovalenko, N., Bertrand, G., Oliveira, D., Wittenberg, A., Wellmer, F.-W., Horwath, Z., & Hollis, J. (2023). *Strategic minerals of Ukraine and their investment attractiveness*. BRGM.

Rudko, G. I., Netskiy, O. V., Nazarenko, M. V., & Khomenko, S. A. (2012). *National and international systems of Mineral Resources Classification: state and perspectives of alignment*. Bukrek [in Ukrainian].

State Commission of Ukraine on Mineral Resources. (2017). *Methodological guidelines for the application of the Classification System of*

the template of the Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards ("CRIRSCO") to the geological and economic assessment of reserves and resources of deposits of solid combustible and ore minerals submitted for state examination and assessment [in Ukrainian]. <https://www.dkz.gov.ua/ua/diyalnist/normativno-pravova-baza>

State Commission of Ukraine on Mineral Resources. (2021). *Methodological guidelines on bringing reserves of objects recorded in the State Balance of Mineral Reserves of Ukraine, which are not under development, into compliance with requirements of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Subsoil Fund* (approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 05.05.1997 № 432 (with amendments)) [in Ukrainian]. https://www.dkz.gov.ua/files/Metodichn%C3%AD_rekomendatsiya_perevoda_zapasa_persha_redakts%C3%ADya_2_redaction.pdf

UNECE. (2015, May 15). *Bridging Document between the Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO) Template and the United Nations Framework Classification for Resources (UNFC)*. [in Ukrainian]. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf

UNECE. (2019). *United Nations Framework Classification for Resources*. UNECE Energy Series, No. 61. https://unece.org/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/publ/UNFC_ES61_Update_2019.pdf

Verkhovna Rada of Ukraine. (1994). Code of Ukraine "On Subsoil" (постанова від 27.07.1994 р. № 133/94). *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 36, 340 [in Ukrainian].

Vyzhva, S. A., Kurylo, M. M., & Balega, A. V. (2018). Regional aspects of the development and renewing of the domestic mineral and raw material base and methods of their financial support. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 12–17 [in Ukrainian].

Отримано редакцію журналу / Received: 10.02.24

Прорецензовано / Revised: 10.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Stanislav LYTUVNIUK, PhD (Geol.)

ORCID ID: 0000-0003-3763-2100

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

State Commission of Ukraine on Mineral Resources, Kyiv, Ukraine

PRACTICAL APPLICATION OF THE METHODOLOGY OF CONVERSION AND COMPARISON OF DIFFERENT CLASSIFICATION SYSTEMS OF ASSESSMENT OF MINERAL RESOURCES ON THE EXAMPLE OF DOMESTIC GRAPHITE AND COPPER DEPOSITS

Background. The analysis of practical application of comparison results by groups of classification features of mineral raw material assessment systems has applied and methodological significance. Methodological approaches to the harmonization (conversion) of various classification systems allow us to update the State Subsoil Fund of Ukraine according to criteria of the United Nations Framework Classification for Resources and identify promising investment directions at various stages of subsoil use.

Methods. Considering the experience and results of the state expertise of geological and economic assessment materials for graphite and copper reserves and resources, a wide range of studies, which includes general scientific and special methods of scientific and applied research, has been conducted. In addition to general theoretical methods of analysis, statistics and systematization, a set of methods of geological and commercial characteristics of graphite and copper deposits has been used to achieve the goal.

Results. The analysis of reserves and resources categories of the most widespread classification systems, which have a reliable bridging and harmonization, has been conducted. Harmonization (conversion) and comparison of different classification systems for the assessment of mineral resources has been performed for domestic graphite and copper deposits based on the European Union list of critical mineral raw materials. Research results suggest the development of a unified classification system for stakeholders (state, investor, society) in order to make decisions in the field of resource management at all levels.

Conclusions. Presented methodological studies on the development of unified approaches to the assessment of reserves and resources accounted for by the State Balance provide an opportunity to determine the investment potential of undeveloped subsoil areas at the initial stages. Suggested mechanism for bringing the undistributed subsoil fund into compliance includes the harmonization of reserves, which are accounted for, with different classification systems according to three UNFC criteria: determination of the degree of geological knowledge (G-axis); the degree of feasibility study (F-axis); and commercial significance (E-axis).

Keywords: accounting, mineral raw materials, United Nations Framework Classification for Resources, categories, classification features.

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

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

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.4-047.26:556.3:553(477.72-25)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.09>

Тетяна КОШЛЯКОВА, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
ORCID ID: 0000-0001-8551-3531
e-mail: tatianakoshliakova@gmail.com

Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М. П. Семененка НАН України, Київ, Україна

Олексій КОШЛЯКОВ, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-3090-4855
e-mail: kosh_57@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ЗМІНИ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ПИТНИХ ПІДЗЕМНИХ ВОД ХЕРСОНСЬКОГО РОДОВИЩА ЗА ДАНИМИ ТРИВАЛИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У ДОВОЄННІ ЧАСИ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О. Л. Шевченком)

Вступ. Після руйнування Каховської ГЕС, водозливної греблі та спрацювання Каховського водосховища питання забезпечення водою українського півдня постало дуже гостро. Найболючішою ця проблема є саме для Херсонської обл. У зв'язку із цим виникла необхідність проведення моніторингових досліджень за якістю підземних вод, що слугують джерелом водопостачання для населення Херсона. Аналіз змін основних показників хімічного складу підземних вод у часі дає змогу оцінити потенційні ризики для здоров'я споживачів і вийти на прогностичні оцінки стану досліджуваної гідрогеологічної системи.

Методи. У процесі виконання роботи були застосовані математико-статистичний, графо-аналітичний методи дослідження, виконано порівняльний аналіз та здійснено побудови за допомогою спеціалізованого програмного засобу GW_Chart.

Результати. Виявлено високу кореляцію між величиною водовідбору і перманганатною окиснюваністю та вмістом фтору. Встановлено, що протягом досліджуваного періоду (із 2009 до 2021 р.) сталися зміни у загальному хімічному складі підземних вод – у катіонному складі відбувся перехід від кальцієво-магнієвого до натрієво-калієвого, в аніонному – від хлоридно-гідрокарбонатного до гідрокарбонатно-хлоридного. Виконано оцінку неканцерогенного ризику за безпороговим методом для Mn та F . З'ясовано, що за F рівень небезпеки є надзвичайно високим, а за Mn – катастрофічним.

Висновки. Зроблено висновок про те, що підземні води у відкладах верхнього сармату, які експлуатуються більшістю обстежених свердловин, на території м. Херсона мають складну спрямованість змін хімічного складу, залежно від умов їхнього формування, що визначаються комплексом природних і техногенних чинників. Ключову роль відіграють: фільтраційні властивості водотривких шарів у покриві водоносного горизонту, наслідки від скидання госпфекальних вод до відкладів меотису-понтю, відсутність централізованої каналізації в межах приватного сектору, живлення поверхневими водами р. Дніпро, конструктивні особливості свердловин, експлуатаційні навантаження на водоносний горизонт. Загалом можна стверджувати, що якісний склад підземних вод зазнає суттєвих змін. Усі ці чинники надають території родовища чітко вираженої площинної, а в деяких випадках і вертикальної гідрохімічної зональності підземних вод.

Ключові слова: підземні води, гідрогеохімія, Херсонське родовище, моніторингові дослідження, оцінювання ризику.

Вступ

Забезпечення водної безпеки України є важливим стратегічним завданням, адже від стану водних ресурсів країни залежить розвиток усіх галузей економіки. Споживачі 40 % території нашої країни використовують воду, що не відповідає вимогам вітчизняних нормативних документів. За даними ООН, станом на 2022 рік Україна посідала 66 місце серед 180 країн за якістю питної води. У сучасних умовах збройної російської агресії та подальшого повоєнного відновлення проблема забезпечення населення якісною питною водою набуває ще більшої актуальності. Після руйнування Каховської ГЕС, водозливної греблі та спрацювання Каховського водосховища питання забезпечення водою українського півдня постало ще гостріше. Найбільш болючою ця проблема є саме для Херсонської обл.

Централізоване водопостачання м. Херсон забезпечується, зокрема, з підземного джерела – Херсонського родовища питних підземних вод за допомогою артезіанських свердловин. За свідченням вітчизняних учених, основним джерелом водопостачання міста є верхньосарматський водоносний горизонт, який використовується його населенням з XIX ст. (Охріменко, Біла, & Ляшенко, 2019). У той час вода мала мінералізацію від 246 до 854 мг/дм³. Проте зі збільшенням водопостачання відбулося порушення технології експлуатації артезіанських свердловин. Нині 76 % водозабірних споруд у Херсоні експлуатуються з перевищенням нормативного терміну,

30 % свердловин подають воду з відхиленням від державних стандартів за солемістом. Крім того, у процесі експлуатації конкретного водоносного шару відбувається приплив небажаних інгредієнтів з інших горизонтів по всій площі депресії. Для артезіанських вод Херсона головними такими інгредієнтами є катіони й аніони легкорозчинних солей металів, а інколи – амоніак, нафтопродуктів, сполук нітрогену. За даними вітчизняних учених (Щербак, 2014; Охріменко, Біла, & Ляшенко, 2019) прогресивне погіршення якості питної води в Херсоні відбувається протягом кількох останніх десятиріч. Особливо небезпечним чинником є просочування сильно забруднених вод з верхнього шару в продуктивний водоносний горизонт. Забруднення неогенового шару під Херсоном стає вже тепер небезпечним для його використання як джерела питних вод. Крім того, із середини 90-х років минулого століття з'явилися незаконно пробурені свердловини в приміських зонах Херсона. Ураховуючи недотримання правил спорудження, розміщення, вимог санітарних норм, такі свердловини також здійснюють негативний вплив на екологічний стан підземної гідросфери.

Іншою проблемою Херсону є підтоплення території, що загрожує безпеці проживання населення, негативно впливає на стан підземних комунальних мереж житлових і промислових будівель, транспортної мережі. Це явище зумовлено як природними чинниками, так і негативними наслідками діяльності людини. Це – безстічний рельєф з природними подовими пониженнями (район залізничного

© Кошлякова Тетяна, Кошляков Олексій, 2024

вокзалу, Млини, Північний, Текстильників), відсутність природного дренажу, що пов'язано зі знищенням ярів. Значно загострили цю проблему збільшення площі забудови, зменшення зелених зон, витікання води з водопровідних і каналізаційних мереж під час аварій, порушення нормальної роботи систем дощової каналізації, останнім часом – наслідки військових дій.

Зазначені чинники свідчать про необхідність проведення моніторингових досліджень за якістю підземних вод, які слугують джерелом водопостачання для населення Херсону. Аналіз змін основних показників хімічного складу підземних вод у часі дасть змогу оцінити потенційні ризики для здоров'я споживачів і вийти на прогностичні оцінки стану досліджуваної гідрогеологічної системи.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Проблемі погіршення якості питних підземних вод м. Херсона вчені розглядали в низці публікацій останніх років. Зокрема, дисертаційне дослідження О. Щербак було присвячене регіональній оцінці просторово-часових закономірностей зміни еколого-гідрогеологічних умов верхньоміоценового водоносного комплексу у зв'язку з проблемою екологічної безпеки питного водопостачання на території Херсонської обл. (Щербак, 2015). Авторка звернула увагу на тенденцію до скорочення ресурсів питних підземних вод на території південних та південно-східних областей України, де під впливом комплексу природних і техногенних факторів розвивається процес регіонального засолення прісних підземних вод, зокрема й основних експлуатаційних водоносних горизонтів. Найбільших масштабів цей процес набув у межах саме Херсонської обл., де, за попередньою оцінкою, відбулося зменшення ресурсів прісних підземних вод на 20 % із часів регіонального оцінювання. О. Охріменко зі співавторами (Охріменко, Біла, & Ляшенко, 2019) представили результати гідрохімічного аналізу водопровідної води з різних районів м. Херсона, а також навели критерії якості та показники фізіологічної повноцінності мінерального складу досліджуваної питної води. Автори виявили, що якість питної води відповідає стандартам лише в окремих районах міста, а найкращі показники має вода, що постачається зі свердловини на Карантинному острові, тому на перспективу для забезпечення м. Херсона екологічно чистою питною водою необхідно облаштовувати водозабори на лівобережжі області. Науковий інтерес викликають і публікації В. Малєєва та В. Безпальченко (Малєєв, & Безпальченко, 2020), а також Л. Василюк і О. Непші (Василюк, & Непша, 2018). Автори розглядали питання щодо водопостачання та водовідведення в населених пунктах Херсонщини та запропонували першочергові заходи з реформування водного господарства області. Наголошувалося на тому, що стратегія водопостачання та водовідведення в Херсонській обл. має спиратися на основні положення Водного кодексу України та нормативні акти Євросоюзу.

Загалом слід зауважити, що кількість публікацій, які містять практичні дані щодо багаторічної динаміки показників хімічного складу підземних вод, є незначною.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Зважаючи на складні природні умови живлення та розповсюдження продуктивних водоносних горизонтів Херсонського родовища, вкрай необхідно впровадити систему моніторингових досліджень. За відсутності такої системи, виходом є залучення архівних і фондових даних за попередні роки. Історія експлуатації окремих свердловин, що використовуються для централізованого водопостачання населення міста, сягає понад 50 років. Також виникає необхідність оцінювання ризиків для здоров'я

населення з позиції споживання води неприйнятної якості. Автори статті, окрім класичного підходу, що передбачає порівняння окремих показників хімічного складу підземних вод із гранично допустимими концентраціями відповідно до вітчизняних нормативів, виконали оцінювання неканцерогенного ризику за безпороговим методом за окремими мікроелементами (Bernard, 2003).

Мета дослідження – виявлення особливостей змін хімічного складу питних підземних вод Херсонського родовища, що використовується для питного постачання населення м. Херсон, за даними тривалих спостережень у довоєнні часи. У статті використано також останні звітні матеріали щодо експлуатаційних запасів досліджуваного родовища підземних вод (Лизогуб, 2021).

Методи

Під час виконання дослідження авторами використано порівняльний метод, прийоми математичної статистики з побудовою графіків і діаграм. З метою з'ясування ризику для здоров'я населення виконано оцінювання неканцерогенного ризику за безпороговим методом щодо окремих мікроелементів.

Характеристика території дослідження. Обстежений водозабір Херсонського родовища підземних вод на правобережжі Дніпра складається зі 144 свердловин: ділянка "Кіндійська-I" – 9, "Кіндійська-II" – 34, "Верхньо-Антонівська" – 12, "Херсонська-I-II" – 89. Проте 76 % свердловин експлуатуються з перевищенням нормативного терміну, що становить 24 роки (Охріменко, Біла, & Ляшенко, 2019). Абсолютна більшість свердловин каптують водоносний горизонт у відкладах верхньосарматського підрегіонарусу верхнього міоцену, за винятком деяких свердловин у прибережній частині Дніпра в межах ділянок "Кіндійська-I", "Кіндійська-II", "Верхньо-Антонівська", які експлуатують суміжні водоносні горизонти у відкладах верхнього сармату та меотис-понтичного віку, а також чотирьох свердловин ділянки "Кіндійська-I", що були переобладнані на водоносний горизонт у відкладах середнього сармату. Хімічний склад підземних вод по площі Херсонського родовища є досить неоднорідним. Переважають води хлоридно-гідрокарбонатного магнієво-кальцієво-натрієвого складу з мінералізацією до 1 г/дм³, зустрічаються також води з мінералізацією до 3 г/дм³ сульфатно-хлоридного та хлоридного складу. За складними геологічної будови родовище належить до II групи – зі складними умовами (Лизогуб, 2021).

Досліджені свердловини пробурені у 1957–2018 рр. Глибини становлять від 21,1 до 127,0 м. На жаль, через відсутність даних про глибину та конкретний час відбору проб води в окремих свердловинах, а також з огляду на значну тривалість експлуатації водозабору автори мають можливість розглядати отримані результати лише як усереднені проби з водоносної системи, яку досліджують.

Підземні води більшості свердловин відповідають ДСанПіну 2.2.4-171-10 "Вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною". Щодо деяких свердловин ділянок "Кіндійська-I", "Кіндійська-II", "Верхньо-Антонівська", а також свердловин, розташованих у межах західної та південної (історична частина міста) ділянок "Херсонська-I", "Херсонська-II" відмічаються відхилення в бік перевищення в підземних водах допустимих концентрацій хлоридів, сульфатів, загальної жорсткості, сухого залишку та вмісту азотних сполук.

Особливість регіонального водозабору полягає в тому, що він розміщується безпосередньо в межах промислово-міської агломерації м. Херсона.

У геоструктурному сенсі територія досліджень належить до Причорноморської западини. Кристалічний

фундамент залягає на глибині близько 1800 м. Причорноморська западина виповнена мезозой-кайнозойськими відкладами. Водовмісними породами є практично усі пористі та тріщинуваті різновиди порід. Більшість із них (крім понтичних і четвертинних) залягають нижче сучасного базису ерозії. Найбільший інтерес викликає товща від четвертинних і неогенових відкладів (зона активного водообміну), що містить підземні води, придатні для використання в господарчо-питних цілях, і перший від поверхні регіонально витриманий водотривкий шар середнього та нижнього сармату, до відкладів верхнього олігоцену, представлених переважно глинистими породами, які знизу обмежують зону активного водообміну (Лизогуб, 2021).

Середньосарматський підрегіонарус (N_1s_2). Відклади середнього сармату поширені по всій території, залягають на породах нижнього сармату. Представлені в нижній частині розрізу темно-сірими, чорними глинами. Вище глин залягає пачка дрібнозернистих пісків потужністю до 40 м. Верхню частину шару утворюють вапняки світло-сірі, органогенно-уламкові, іноді доломітизовані. Загальна потужність середньосарматських відкладів збільшується з півночі на південь від 45,4 до 86,2 м.

Верхньосарматський підрегіонарус (N_1s_3). Відклади верхнього сармату поширені повсюдно. Розрізи порід невитримані, зустрічаються часті фаціальні заміщення та перешарування вапняків, мергелів і глин, рідше піски. Вапняки білі, світло-сірі пелітоморфні, органогенні, оолітові, черепашкові; глини зеленувато-сірі, щільні, в'язкі; мергелі світло-сірі, вапняковисті. Загальна потужність верхньосарматських відкладів збільшується з півночі на південь та південний схід і змінюється із 21,4 до 60 м. Глибина залягання покрівлі 21,5–65 м.

Меотичний регіонарус (N_1m). Відклади меотичного регіонарусу поширені по всій території за винятком долини р. Дніпро. Залягають вони з переривом на верхньосарматських відкладах. Літологічно відклади представлені породами відкритого морського басейну: вапняками світло-сірими, білими, жовтуватими-сірими органогенними, уламковими, оолітовими, рідше мергелями світло-сірими, глинами зеленувато-сірими, піщанистими. Потужність меотичних відкладів збільшується з північного сходу на південний захід від 7 до 28,3 м.

Понтичний регіонарус (N_1p). Відклади понтичного регіонарусу поширені майже по всій території, за винятком ділянки на сході району, що розмита кімерійською трансгресією, та долини р. Дніпро. Залягають породи понтичного регіонарусу з переривом на меотичних відкладах. Генетично відклади представлені породами мілководного морського басейну: вапняками-черепашниками жовтого, буруватого та сіруватого-жовтого кольору, перекристалізованими, кавернозними. Покрівля вапняків понтичного ярусу заглиблюється з півночі на південь. Максимальна потужність досягає 9 м.

З позиції гідрогеології територія входить до Причорноморського артезіанського басейну пластових напірних вод, який завдяки частому чергуванню пластів колекторів з водотривкими шарами містить велику кількість водоносних горизонтів.

Водоносні горизонти у відкладах меотичного та понтичного регіонарусів верхнього міоцену (N_1m+N_1p) на території району досліджень не поділені водотривкими шарами й утворюють спільну водоносну систему. Водовмісні породи представлені органогенно-детритусовими, оолітовими вапняками буруватого-сіруватого-жовтого кольору, тріщинуватими, кавернозними. Водоносний інтервал напірно-безнапірний. Залягає на

глибині від 15 до 41 м. Потужність водоносного інтервалу коливається від 8,5 до 32,6 м. Існують окремі ділянки, де водоносний горизонт залягає першим від поверхні і не перекритий водотривкими відкладами. За хімічним складом води хлоридно-сульфатні, сульфатно-хлоридні з мінералізацією від 1 до 4,6 г/дм³. На території м. Херсона цей водоносний горизонт до початку 70-х років використовували як колектор для скидання відпрацьованих і госпфекальних вод та обмежено використовували для технічного водопостачання.

Водоносний горизонт у відкладах верхньосарматського підрегіонарусу верхнього міоцену (N_1s_3). Водовмісні породи представлені вапняками білими, світло-сірими, пелітоморфними, оолітовими, тріщинуватими. У підшві горизонту зустрічаються глини й мергелі того ж віку потужністю 1,5–4 м. У місцях їхньої відсутності має зв'язок із середньосарматським водоносним горизонтом. Потужність водоносного інтервалу змінюється від 13 до 26 м і збільшується в південному напрямку. Глибина залягання покрівлі до 46 м. Абсолютні відмітки покрівлі від 20 до 0 м. Унаслідок експлуатації Херсонського родовища підземних вод у цьому водоносному горизонті утворилася депресійна воронка. Води різного хімічного складу – гідрокарбонатні, гідрокарбонатно-хлоридні, хлоридно-гідрокарбонатні, хлоридні, хлоридно-сульфатні з мінералізацією від 0,2–0,5 г/дм³ на ділянках заплави; до 0,5–2,3 г/дм³ і більше на іншій території. Найбільші значення фонові мінералізації припадають на ті ділянки, де з поверхні глини повністю відсутні, або яким властива висока проникність верхньопліоцен-нижньоплейстоценових глин. Це сприяє потраплянню до нього через буферні меотис-понтичні шари разом з атмосферними, техногенними водами та розвантаженням ґрунтових вод розчинених солей із лесоподібних суглинків і "сухих" вапняків понтичного регіонарусу, а також різного роду забруднень. Тип води при цьому змінюється з гідрокарбонатного, хлоридно-гідрокарбонатного на хлоридний, сульфатно-хлоридний. Живлення водоносного горизонту відбувається за межами родовища на схилі Українського кристалічного щита, а також на території поширення Олешківських пісків, у ярах і балках (де він виходить на поверхню) завдяки атмосферним опадам, перетокам із нижче- і вищезалеглих водоносних горизонтів, річкових вод Дніпра.

Водоносний горизонт у відкладах середньосарматського підрегіонарусу верхнього міоцену (N_1s_2) поширений у підшві верхньосарматського, часто без роздільного водотривкого шару. Літологічно представлений переважно пісками дрібнозернистими, глинистими, на півночі в покрівлі шару вапняками. За своїми якісними характеристиками підземні води мають площинну зональність. У заплаві Дніпра та прибережній зоні це води гідрокарбонатного, хлоридно-гідрокарбонатного натрієвого складу з мінералізацією 0,2–0,7 г/дм³. З віддаленням від берегової лінії зростає їхня мінералізація до 1,3–2,8 г/дм³, хімічний склад змінюється на хлоридний, сульфатно-хлоридний, суттєво зростає частка кальцію та магнію в катіонному складі.

Результати

На першому етапі дослідження було обрано ключові показники фізіологічної повноцінності складу питної води, а саме – основні катіони й аніони – HCO_3 , SO_4 , Cl , Na , K , Ca , Mg , а також NH_4 , F , сухий залишок, загальну жорсткість, рН та перманганатну окиснюваність. Для цих показників було виконано порівняння з величиною водовідбору в часі. Часовий проміжок, протягом якого вивчався зв'язок, охоплював понад 10 років – із 2009 до 2020 р. Окрім побудов, були обраховані коефіцієнти кореляції Пірсона. Результати представлено на рис. 1 і 2, а також у табл. 1.

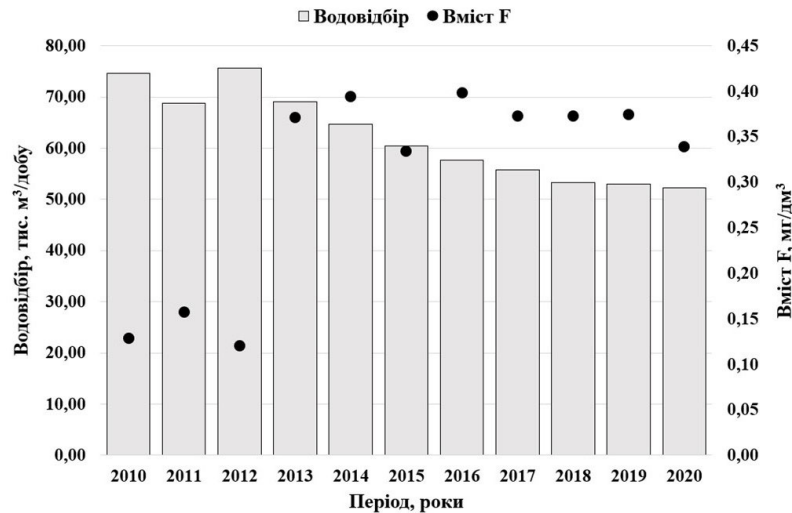


Рис. 1. Графік залежності величини водовідбору та вмісту фтору в досліджуваних підземних водах у період 2010–2020 рр. (водоносний горизонт у відкладах верхньосарматського підрегіоїрису верхнього міоцену)

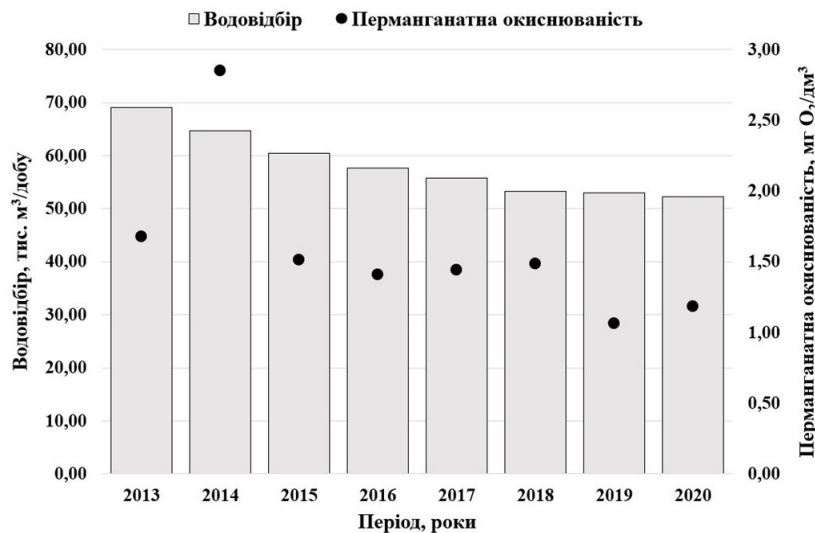


Рис. 2. Графік залежності величини водовідбору та перманганатної окиснюваності у досліджуваних підземних водах у період 2013–2020 рр. (водоносний горизонт у відкладах верхньосарматського підрегіоїрису верхнього міоцену)

Було виявлено низьку кореляцію між величиною водовідбору та вмістом хлоридів, сульфатів і сухим залишком, середню – між величиною водовідбору і загальною жорсткістю, умістом амонію та величиною pH, високу – між величиною водовідбору і перманганатною окиснюваністю та вмістом фтору.

З метою виконання оцінки зміни загального хімічного складу досліджуваних підземних вод у часі було побудовано діаграму Пайпера (рис. 3).

Встановлено, що протягом досліджуваного періоду часу відбулися зміни в загальному хімічному складі підземних вод – у катіонному складі відбувся перехід від кальцієво-магнієвого складу до натрієво-калієвого, в аніонному – від хлоридно-гідрокарбонатного до гідрокарбонатно-хлоридного.

На наступному етапі дослідження авторами застосовано класичний підхід, згідно з яким концентрації компонентів хімічного складу досліджуваних вод порівнювали із гранично допустимими значеннями. Результати представлені у табл. 2. Було зафіксовано перевищення **гранично допустимих концентрацій** ГДК для таких показників як: сухий залишок, загальна жорсткість, SO₄, Cl та Na.

Нині уся суть фізичних і хімічних методів екологічного моніторингу зводиться до порівняння рівнів забруднення компонентів природно-територіальних комплексів, що оцінюються, зі встановленими гранично допустимими концентраціями. Однак сучасна система нормативів не здатна забезпечити екологічну безпеку, тобто захистити довкілля від негативних впливів природного й антропогенного генезису.

Таблиця 1

Коефіцієнти кореляції Пірсона (R) між величиною водовідбору й основними показниками хімічного складу досліджуваних підземних вод

Коефіцієнт кореляції Пірсона (R)	Сухий залишок	Загальна жорсткість	Перманганатна окиснюваність	pH	NH ₄	Cl	SO ₄	F
Водовідбір	0,18	0,5	0,65	–0,4	0,42	0,25	0,14	–0,77

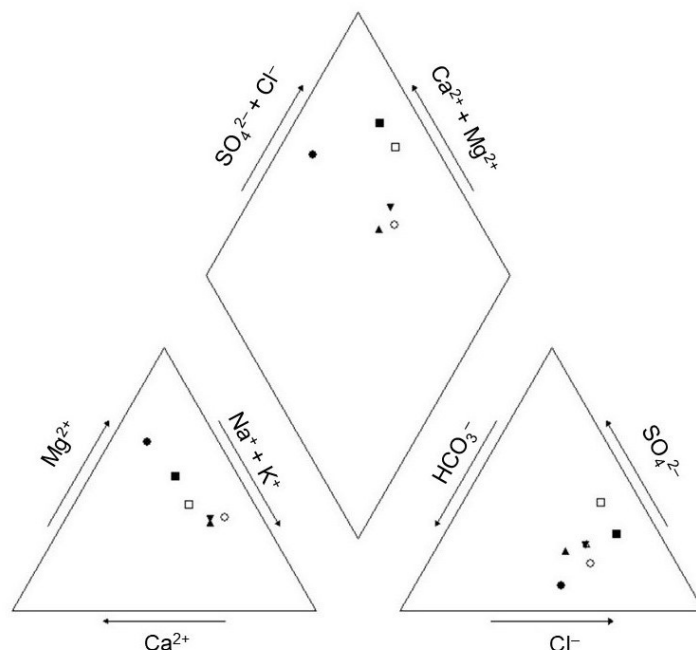


Рис. 3. Діаграма Пайпера, що відображає співвідношення основних катіонів й аніонів у досліджуваних підземних водах:

● – 2009 р., ○ – 2010 р., ■ – 2011 р., □ – 2012 р., ▲ – 2013 р., ◇ – 2015 р., ▼ – 2018 р.

Таблиця 2

Порівняння величин основних показників хімічного складу досліджуваних підземних вод із ГДК згідно з актуальними нормативами

Показник хімічного складу	Діапазон значень	ГДК за ДСТУ 7525:2014*	ГДК за ДСанПіН 2.2.4-171-10**
Сухий залишок, мг/дм³	260–3224	1000	1000
Загальна жорсткість, мг-екв/дм³	3,9–23,7	7	7
pH	7,5–8,2	6,5–8,5	6,5–8,5
Перманганатна окиснюваність, мгО₂/дм³	1,1–2,9	5	5
HCO₃⁻, мг/дм³	143–348	не нормується	не нормується
SO₄, мг/дм³	19–856	250	250
Cl, мг/дм³	38–709	250	250
Ca, мг/дм³	31–832	не нормується	не нормується
Mg, мг/дм³	44–132	не нормується	не нормується
Na+K, мг/дм³	62–347	200	200
Mn, мг/дм³	0,01–0,02	0,05	0,05
F, мг/дм³	0,12–0,42	0,7	0,7

Примітки: * ДСТУ 7525:2014 Державний стандарт України "Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості"; ** ДСанПіН 2.2.4-171-10 Державні санітарні норми та правила "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною"

У зв'язку з обмеженням тривіальних підходів до визначення небезпеки для здоров'я людини з боку довкілля та неможливості встановлення прямих причинно-наслідкових зв'язків виникла необхідність використання сучасних методів оцінювання шкоди здоров'ю – методів аналізу ризику. Це дасть змогу оцінити реальну загрозу для здоров'я людини й обґрунтувати необхідність розроблення відповідних превентивних заходів. Зважаючи на це, на наступному етапі дослідження авторами було виконано оцінювання неканцерогенного ризику за безпороговим методом, що використовує величини безпечних доз, які є індивідуальною характеристикою кожної речовини (Bernard, 2003; Рой, 2017). Для розрахунку були взяті есенційні мікроелементи, біологічну роль яких доведено – Mn та F. Ризик визначали для Mn, що за органолептичним показником шкідливості належить до 3 класу небезпеки, та F, якому відповідає 2 клас небезпеки за санітарно-токсикологічним показником. Розрахунок ризику здійснювали за такою формулою:

$$Risk = 1 - \exp\left(\frac{\ln(0,84)}{ГДК \cdot K_3}\right) \cdot C,$$

де *Risk* – імовірність розвитку неспецифічних токсичних ефектів за хронічної інтоксикації (від 0 до 1); *C* – середня щоденна концентрація речовини, що надходить в організм людини з питною водою протягом життя. Для оцінювання ефектів, пов'язаних із тривалим впливом речовин, використовуємо середнє значення концентрацій за 3 роки; ГДК – гранично допустима концентрація речовин; *K*₃ – коефіцієнт запасу, який приймається залежно від вираженої імовірності віддалених наслідків.

Для аналізу одержаних величин неканцерогенного ризику використовуємо рангову шкалу за рівнями ризику, представленими в табл. 3.

Результати розрахунку ризику за наведеною формулою такі: для F *Risk* = 0,68, для Mn *Risk* = 0,99.

Отже, за F рівень небезпеки є надзвичайно небезпечним, а за Mn – катастрофічний.

Таблиця 3

Характеристика величин неканцерогенних ризиків (Рой, 2017)

Величина ризику	Рівень небезпеки	Опис
До 0,05	Прийнятний	Відсутні несприятливі медико-екологічні тенденції
0,05–0,16	Викликає занепокоєння	Виникає тенденція до зростання неспецифічної патології
0,16–0,5	Небезпечний	Виникає достовірна тенденція до зростання неспецифічної патології за появи одиничних випадків специфічної патології
0,5–0,84	Надзвичайно небезпечний	Виникає достовірне зростання неспецифічної патології за появи значної кількості випадків специфічної патології, а також тенденція до збільшення смертності населення
0,84–1	Катастрофічний	Забруднення довели в цьому разі перейшло в інший якісний стан (поява випадків хронічного отруєння, зміна структури захворюваності, достовірна тенденція до зростання смертності тощо)

Варто зауважити, що нині фахівцями розроблено низку різних методів обрахунку потенційних ризиків для здоров'я населення у зв'язку зі споживанням води неприйнятної якості. Розуміння ризиків від впливу хімічних речовин у довкіллі ускладнюється багатьма факторами, як-от: мінливість і сприйнятливність населення, тривалі затримки між критичним впливом і виявами хвороби, а також фоновий вплив довкілля. Існують також методологічні проблеми у визначенні відповідних ризиків за умов певних фонових впливів навколишнього середовища, оскільки він може змінити базові показники здоров'я або вплинути на реакцію цільової хімічної речовини. Детальніше методологію оцінювання ризиків представлено в роботі (Кошарна, 2023).

Проаналізувавши отримані результати, автори дійшли висновку, що підземні води у відкладах верхнього сармату, які експлуатуються більшістю обстежених свердловин, на території м. Херсона мають складну спрямованість змін хімічного складу, залежно від умов їхнього формування, що визначаються комплексом природних і техногенних чинників. Ключову роль тут відіграють:

- наявність у покрівлі водоносного горизонту водотривких шарів, їхні фільтраційні властивості;
- для крайових ділянок родовища – якісний склад підземних вод за його межами;
- для історичної центральної частини міста – наслідки від скиду госпфекальних вод до відкладів меотису-понту;
- відсутність централізованої каналізації в межах приватного сектору;
- живлення поверхневими водами р. Дніпро;
- конструктивні особливості свердловин;
- експлуатаційні навантаження на водоносний горизонт (Лизогуб, 2021).

Усі перераховані чинники надають території родовища чітко вираженої площинної, а в деяких випадках і вертикальної, гідрохімічної зональності підземних вод.

Основною причиною особливостей поведінки таких показників хімічного складу досліджуваних підземних вод, як F та перманганатна окиснюваність (їхня висока кореляція з величиною водовідбору), автори вважають умови природної захищеності верхньосарматського водоносного горизонту від можливої фільтрації з поверхні. Покривні суглинки містять у собі легкорозчинні солі. На забудованих територіях роль поверхневого стоку зменшується в бік збільшення обсягів вертикальної фільтрації (Лизогуб, 2021). Там, де сформувався горизонт ґрунтових вод, роздільний шар пліоцен-нижньонеоплейстоценових глин є досить надійним, заважає потраплення розчинених солей і забруднень до експлуатаційного горизонту. На ділянках, розташованих на схилах Дніпра, наявність такого шару не заважає забрудненню підземних вод, адже водотривкі глини тут мають значно меншу потужність. Крім того, вони є не настільки щільними внаслідок вивітрювання, а отже, більш

проникними. Можливі зміни хімічного складу через надходження у водоносну систему стічних і каналізаційних вод через брак фактичних даних не розглядали.

Автори припускають, що, потрапляючи до меотис-понтичного водоносного горизонту, фільтраційні води підвищують його природний рівень, додатково розчиняючи солі у відкладах понту (Лизогуб, 2021). Через роздільний шар меотичних глин, який є малопотужним, а іноді й зовсім відсутнім, ці води надходять до водоносного горизонту у верхньосарматських відкладах, значно погіршуючи його якість з позиції умов водопостачання. Загалом спостерігається тенденція до підтягування більш мінералізованих ґрунтових вод до водозабірних споруд унаслідок тривалої експлуатації свердловин. Також на формування якісного складу досліджуваних вод значний вплив має наявність у минулому так званих поглинальних колодязів, через які здійснювалося скидання госпфекалій та інших забруднених вод до відкладів понту. Якість ліквідаційного тампонажу таких колодязів є низькою.

Дискусія і висновки

Унаслідок проведеного дослідження було встановлено, що продуктивні водоносні горизонти Херсонського родовища питних підземних вод за якісним складом характеризуються строкатістю та неоднорідністю. У процесі вивчення багаторічної динаміки, урахувавши коливання величини водовідбору, виявлено високу додатну кореляцію між величиною цього показника та перманганатною окиснюваністю, а також високу від'ємну кореляцію між водовідбором і вмістом фтору. З'ясовано, що в доведений час відбулися зміни в загальному хімічному складі підземних вод – у катіонному складі відбувся перехід від кальцієво-магнієвого до натрієво-калієвого, в аніонному – від хлоридно-гідрокарбонатного до гідрокарбонатно-хлоридного. У багаторічному розрізі зафіксовано перевищення ГДК для таких показників, як: сухий залишок, загальна жорсткість, SO_4 , Cl та Na. Оцінка неканцерогенного ризику за безпороговим методом показала, що рівень небезпеки для здоров'я населення за показниками фтору є надзвичайно небезпечним, а за показниками мангану – катастрофічним.

Варто підкреслити, що, зважаючи на підриєв Каховської ГЕС, гідродинамічна та гідрогеохімічна обстановка регіону зазнала суттєвих змін, що потребує комплексу додаткових досліджень. Представлені у статті результати можуть бути корисними для встановлення фонових довірених показників у межах досліджуваної території.

Внесок авторів: Тетяна Кошлякова – написання (оригінальна чернетка), концептуалізація та формальний аналіз; Олексій Кошляков – написання (перегляд і редагування), валідація даних.

Подяка та джерела фінансування: Роботу виконано в межах наукової теми 0123U100510 "Гідрогеохімія мікроелементів селітебних ландшафтів України як основа раціонального природо-користування" Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення

імені М.П. Семененка НАН України. Автори висловлюють свою подяку авторам звіту, зокрема В. Лизогубу, за люб'язно надані матеріали з детальної геолого-економічної оцінки експлуатаційних вод Херсонського родовища. Основні результати, які були отримані авторами статті за допомогою математико-статистичної обробки, підтверджують висновки, що містяться у звіті (Лизогуб, 2021).

Список використаних джерел

- Василиук, Л., & Непша, О. (2018). Геоecологiчний монiторинг пiдземних вод Херсонської облacтi. *Матерiали XI Мiжнародної науково-практичної iнтернет-конференції "Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Європи та Азії"* (с. 27–29).
- Кожарна, С. К. (2023). *Оцiнювання екологiчних ризикiв*. Iнтернет-ресурс Кiївського національного унiверситету iменi Тараса Шевченка: www.geol.univ.kiev.ua
- Лизогуб, В. О. (2021). Детальна геолого-економiчна оцiнка експлуатацiйних запасiв питних пiдземних вод дiлянок "Кiндiйська-I", "Кiндiйська-II", "Верхньо-Антонiвська", "Херсонська-I-II" Херсонського родовища по свердловинах водозабору МКП "ВУВКГ м. Херсона" (з пiдрахунком запасiв станом на 01.01.2021 р.). *Звiт про розвiдку родовища пiдземних вод*. ВП Пiвденно-українська ГГЕ ДП "УГК".
- Малеев, В. О., & Безпальченко, В. М. (2020). Водопостачання та водовiдведення Херсонської облacтi: стан, проблеми, першочерговi заходи. *Екологiчні науки*, 2(29), 66–71. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.2.10>
- Охрименко, О. В., Біла, Т. А., & Ляшенко, Є. В. (2019). Дослiдження параметрiв якостi водопровiдної води у мiстi Херсон хiмiчними методами. *Воднi бiоресурси та аквакультура*, 2, 134–143. <https://doi.org/10.32851/wba.2019.2.10>
- Рой, І. О. (2017). *Пiдвищення екологiчної безпеки питного водопостачання шляхом iнтенсифiкації процесу окислення органiчних речовин* [Дис. канд. техн. наук, Сумський державний унiверситет]. Iнституцiйний репозитарій Сумського державного унiверситету. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/49091>
- Щербак, О. В. (2014). Метаморфiзація питних пiдземних вод на територiї Херсонської облacтi. *Вiсник Харкiвського національного унiверситету iменi В. Н. Каразiна. Серiя "Геологiя. Географiя. Екологiя"*, 1128, 96–100.
- Щербак, О. В. (2015). Техногенно спричиненi змiни еколого-гiдрогеологiчних умов верхньомiоценового водоносного комплексу на територiї Херсонської облacтi [Дис. канд. геол. наук, Державна установа "Iнститут геохiмiї навколишнього середовища НАН України"]. Iнституцiйний репозитарій Державної установи "Iнститут геохiмiї навколишнього середовища НАН України". <https://www.igns.gov.ua/wp-content/uploads/2022/02/scherbak-dis-5.pdf>

Bernard, L. C. (2003). Risks in Perspective. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 8(2), 50–53.

References

- Bernard, L. C. (2003). Risks in Perspective. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 8(2), 50–53.
- Kosharna, S. K. (2023). *Assessment of environmental risks*. Internet resource of Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian]. www.geol.univ.kiev.ua
- Lyzohub, V. O. (2021). Detailed geological and economic assessment of the operational reserves of drinking groundwater of the "Kindiyska-I", "Kindiyska-II", "Verkhnyo-Antonivska", "Khersonska-I-II" sections of the Kherson deposit according to the water intake wells of the MKP "VUVKG of Kherson" (calculation of reserves as of 01.01.2020). *Research report*. VP South-Ukrainian GGE of State Enterprise "UGK" [in Ukrainian].
- Malieiev, V. O., & Bezpalchenko, V. M. (2020). Water supply and drainage of the Kherson region: state, problems, priority measures. *Environmental sciences*, 2(29), 66–71 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.2-29.2.10>
- Okhrimenko, O. V., Bila, T. A., & Liashenko, Ye. V. (2019). Study of parameters of tap water quality in the city of Kherson by chemical methods. *Aquatic bioresources and aquaculture*, 2, 134–143 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32851/wba.2019.2.10>
- Roi, I. O. (2017). *Increasing the ecological safety of drinking water supply by intensifying the process of oxidation of organic substances* [PhD (Engin.) dissertation, Sumy State University]. Institutional repository of Sumy State University [in Ukrainian]. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/49091>
- Scherbak, O. V. (2014). Metamorphosis of drinking groundwater in the territory of the Kherson region. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 1128, 96–100.
- Scherbak, O. V. (2015). Technogenically induced changes in the ecological and hydrogeological conditions of the Upper Miocene aquifer complex in the territory of the Kherson region [PhD (Geol.) dissertation, State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine"]. Institutional repository of State Institution "Institute of Environmental Geochemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine" [in Ukrainian]. <https://www.igns.gov.ua/wp-content/uploads/2022/02/scherbak-dis-5.pdf>
- Vasyliuk, L., & Nepsha, O. (2018). Geoecological monitoring of groundwater in the Kherson region. *Materials of the XIth international scientific and practical internet conference "Problems and prospects of the development of modern science in the countries of Europe and Asia"* (p. 27–29) [in Ukrainian].
- Отримано редакцією журналу / Received: 23.03.24
Прорецензовано / Revised: 13.05.24
Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Tetiana KOSHLIAKOVA, PhD (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: 0000-0001-8551-3531

e-mail: tatianakoshliakova@gmail.com

M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Olecsii KOSHLIAKOV, DSc (Geol.), Prof.

ORCID ID: 0000-0003-3090-4855

e-mail: kosh_57@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

CHANGES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF DRINKING GROUNDWATER OF THE KHERSON DEPOSIT ACCORDING TO LONG-TERM OBSERVATIONS IN PRE-WAR TIMES

Background. After the destruction of the Kakhovskaya HPP and the spillway dam, and devastation of the Kakhovskaya Reservoir, the issue of water supply to the south of Ukraine became very acute. This problem is the most painful for the Kherson region. In this regard, there was a need to conduct monitoring studies on the quality of groundwater, which serves as a source of water supply for the population of Kherson. The analysis of changes in the main indicators of the chemical composition of groundwater over time makes it possible to assess potential risks for the health of consumers and to obtain predictive assessments of the state of the studied hydrogeological system.

Methods. When performing the work, mathematical-statistical, graph-analytical research methods were applied, comparative analysis was performed, and constructions were carried out using the specialized software tool GW_Chart.

Results. A high correlation was found between the amount of water withdrawal and permanganate oxidizability and fluorine content. It was established that during the studied period of time (from 2009 to 2021) there were changes in the general chemical composition of groundwater – in the cationic composition there was a transition from a calcium-magnesium to a sodium-potassium, in the anionic composition – from chloride-hydrocarbonate to bicarbonate-chloride. A non-carcinogenic risk assessment was performed using the non-threshold method for Mn and F. It was found that the danger level for F is extremely high, and for Mn – catastrophic.

Conclusions. The authors made the conclusion that groundwaters in the Upper Sarmatian sediments, which are exploited by the majority of examined wells on the territory of Kherson, have a complex direction of changes in chemical composition, depending on the conditions of their formation, which are determined by a complex of natural and man-made factors. The key role is played by: filtration properties of confining bed layers in the roof of the aquifer; consequences of the discharge of domestic sewage to Meotis-Pont deposits; lack of centralized sewerage within the private sector; recharge with surface waters of the Dnipro River; design features of the wells; operating loads on the aquifer. In general, it can be stated that the qualitative composition of groundwater has undergone significant changes. All these factors give the territory of the deposit a clearly defined lateral and in some cases, vertical hydrochemical zonation of groundwater.

Keywords: groundwater, hydrogeochemistry, Kherson deposit, monitoring studies, risk assessment.

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 551.509.324

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.10>

Jamal HUSEYNOV, Researcher

ORCID ID: 0000-0002-7878-578X

e-mail: camal_huseynov_88@mail.ru

Azerbaijan Airlines JSC, Azeraeronavigation HHI, Zabrat Airport, Baku, Azerbaijan Republic

Allahverdi TAGIYEV, Researcher

ORCID ID: 0000-0001-5526-3631

e-mail: allahverdi.taghiyev@gmail.com

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan Republic

THE CHANGES OF THE AIR TEMPERATURE CHARACTERISTICS IN THE AZERBAIJAN TERRITORY DURING GLOBAL CLIMATE CHANGES PERIOD

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. спієроб. О. Л. Шевченком)

Background. Air temperature observation data covering the years 1981–2022 of about 70 hydrometeorological stations operating in the territory of the Republic of Azerbaijan were used in the study. In order to determine the influence of climate changes on the air temperature regime, the results of 1981–2010 were compared with the corresponding results of 2011–2022.

Methods. In the study, the trend of monthly, seasonal and multiannual changes in air temperature was considered using mathematical, statistical and cartographic methods.

Results. Studies show that the air temperature has increased by 0.9°C at the country level. The positive anomaly has been reached to 1.3°C at the belt with an altitude of 2001–2500 m. The main high indicators were noted in highland regions. The temperature anomaly is in the range of 1.5–1.7°C, mostly in May and June months. Long-term temperature dynamics show that in 2001–2010 the temperature increase (0.057°C / 1 year) is observed. It was the warmest time during 1961–2022 comparing with previous decade.

The results of the study can be used in the protection against climate changes, mitigation and studying the modern temperature regime. In addition, solar radiation can be used as an alternative energy source in flat areas where high air temperature indicators are observed. The results will be announced at the conference on climate change COP 29 (Conferences of the Parties), which will be held in Baku on November 11–22, 2024.

Conclusions. The influence of climate changes in the air temperature regime in the territory of Azerbaijan will lead to the disruption of the traditional climate regime, the disappearance of the green landscape and expansion of semi-desert and arid landscape in the front mountainous areas, the increase of possible evaporation and the increasing of environmental crises such as drought at the 1000 m elevations. An increase in the radiation balance in Nakhchivan province may worsen the continentality of the climate type here. The increase in temperature in the Kura depression province will create conditions for the expansion of the semi-desert-arid climate in the piedmonts of the Greater Caucasus Mountains.

Key words: mathematical, statistical and cartographic methods, temperature indicators, greenhouse effect, flat areas, alternative energy source, climate norm, altitude zone, ArcGIS.

Background

The Earth has undergone climate changes several times during the geological eras in which it was formed. Such processes have been observed with millennia of "warming" and "glaciation" (Mahmudov, 2022; Richard et al., 2013). Long-term changes were formed as a result of natural factors. However, during the last 200–250 years, the Earth's temperature has been continuously increasing, and this process continues rapidly, although it sometimes slows down (Huseynov, 2020). Since 1860, when hydrometeorological measurements were made, the global temperature has increased by 1.5–2.0°C (Rzaeva, Tagiyev, & Zeynalova, 2022; Rzaeva, Guseynov, and Tagiyev, 2023). Researchers consider that modern climate changes are caused by anthropogenic influences (Huseynov, 2022; Thomas, Rachael, & Cameron, 2020).

According to a continuous temperature analysis by NASA's of Goddard Institute for Space Studies (GISS), the average global temperature on Earth has increased by at least 1.1°C since 1880. Most of the global 'warming' has occurred in recent times, amounting to about 0.15–0.20°C per decade since 1975 (Goddard Institute for Space Studies, 2023).

In the middle of the 20th century, the temperature was in a stable phase with small amplitudes, which can be explained by natural variability and the cooling effect of aerosols created by factories, electric plants and motor vehicles during the years of rapid economic growth after World War II. After the war, the increase in fossil fuel use (5 % per year) increased the amount of greenhouse gases in the atmosphere, which in turn formed the greenhouse

effect. Rapid cooling occurred due to aerosol pollution of the atmosphere. Unlike aerosols, greenhouse gases accumulate in the atmosphere more slowly, but they remain there for a longer time (Ahmadov, 2023).

According to the Special Science Report on Climate Change of US for 2017, if annual emissions continue to rise as fast as they have done since 2000, models predicted that global temperatures will be at least 1.2°C higher than the average indicators of 1901–1960 at the end of this century, as well as 2.5°C is predicted. If average annual emissions increase more slowly and begin to decrease significantly by 2050, model-predicted temperatures will still be at least 0.6°C and possibly as much as 1.4°C warmer than the first half of the 20th century (Mammadov, 2015; Fel, 2023).

Observations show that the last 10 years from the beginning of these measurements until today are the years when the highest air temperature indicators were recorded. In particular, the air temperature indicators of 2016–2023 broke all historical records (Goddard Institute for Space Studies, 2023).

One of the regions most affected by climate change is the South Caucasus region located in Azerbaijan. In recent times, the reduction of glacier areas, floods, floodings, lightning, hail, torrential rains, changes in the level of the Caspian Sea, and other dangerous natural manifestations are developed (Abdullayev, & Rzayev, 2023; Kazimova, 2015).

Before that, R. Mahmudov, F. Imanov, N. Huseynov, A. Mammadov, S. Safarov, U. Taghiyeva, H. Nabiyeve, C. Huseynov, and other scientists have conducted various studies related to climate changes in the country. The

studies of the researchers show that air temperature increases in the range of 0.7–1.0° C and atmospheric precipitation decreases in the range of 26–31 mm (7 %) (Huseynov, & Ismayilova, 2023; Mahmudov, 2022; Huseynov, 2022). The constant change of meteorological elements in the territory of Azerbaijan, the increase of time series necessitates the constant study of climate changes.

Methods

The study is based on the temperature observation data of 68 continuously operating hydrometeorological stations of the National Hydrometeorological Service covering the years 1981–2022. In addition, periodical publications, electronic resources and satellite data were also referred to in the study (Annual meteorological station data, 2020). Since there is no data about the southern and eastern part of the Lesser Caucasus region, satellite data was used. Mathematical, statistical and cartographic methods were used in the study. With these methods, the mathematical expectation of the ranks, the statistical significance was checked, and the regularities of the distribution on the earth's surface were investigated. As record indicators have been observed since the last 10 years of temperature measurements until today, a comparative analysis of the air temperature indicators of 1981–2010 and 2011–2022, recommended by the General World Meteorological Organization as the last norm, was carried out.

Purpose of work. The purpose of the study is to determine the influence of global climate changes on the air temperature regime in the territory of the Republic of Azerbaijan in 2011–2022, comparing with the climate norm (1981–2010). For this, time-space variations of air temperature were investigated. In order to detect any regularity in the obtained results, the distribution of air temperature indicators on the earth's surface was mapped using cartographic methods for both periods (1981–2010, 2011–2022).

Results

As the territory of the country has a complex relief, it is impossible to conduct complex research. Therefore, regions with similar physical-geographical and climatic characteristics should be studied individually. Also, global circulations constantly show the effects of climate changes in the synoptic conditions of the country located in complex conditions (State Land and Mapping Committee, 2014; Mammadov, 2015).

Our research shows that, compared to 1961 & 1990, during 2013–2022, the area of large glaciers in Azerbaijan decreased by 25 % in Tufandag, 21.3 % in Bazarduzu, and 15.7 % in Shahdag. In all glaciers, the ice line retreated 95–100 m in just 6 years (2016–2022). In the rivers fed by snow and glacier waters in the Greater and Lesser Caucasus, as a result of rapid melting in the spring months (end of March–April), the volume of water in the rivers increases leading to waterflood sharply, and this is accompanied by landslides and the periodic recurrence of floods. As a result, in river basins such as Gobustan–Absheron, water consumption decreases sharply in summer months, and the drought extends for a long time.

The negative impact of climate change on water resources is manifested in both quantitative and qualitative parameters. Thus, a sharp increase in the degree of water mineralization is observed in the lower reaches of the rivers in the mountainous areas of Azerbaijan. The level of underground water decreases, piezometric pressure in geological wells and water consumption decrease sharply. The quality of groundwater, especially the degree of mineralization, increases, and this, in turn, negatively affects the quality indicators of pressurized water.

Conducted analysis shows that in 2011–2022, depending on the regions in Azerbaijan, the air temperature varies in the range of –1–6° C in January, 0–6° C in February, and 3–9° C in March (Tab. 1). During these months, the minimum average monthly temperature was observed in the north-east of the Greater Caucasus region and Nakhchivan province, and the maximum average monthly temperature was observed in the Absheron water area and Kura depression (Huseynov, & Ismailova, 2023) located within the Gobustan–Absheron region of the Greater Caucasus province. In spring, the air temperature increases, in April it is in the range of 9–14° C, in May it is 14–21° C, in June it is in the range of 19–26° C. In these months, the minimum average monthly temperature is observed in the northeastern piedmonts of the Greater and Lesser Caucasus mountains. Air temperature reaches its maximum in July (21–28° C) and August (20–28° C). In these months, the maximum values are recorded in the Absheron water area (27° C) and Kura depression (28° C).

Starting from September (16–23° C), the temperature decreases in all provinces. Air temperature is 10–17° C in October, 4–11° C in November and 1–8° C in December.

Table 1

Indicators of air temperature in physical-geographic provinces and regions in different periods

Periods	Province	Months												y.
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1981–2010	Absheron water area	5.1	4.8	6.9	11.5	17.0	22.5	25.7	26.1	22.2	16.9	11.3	7.0	14.8
	northeastern of Greater Caucasus	–1.7	–1.2	2.1	7.6	12.1	16.6	19.2	19.0	14.8	9.8	4.2	0.4	8.6
	South, southeast of Greater Caucasus	0.3	1.0	4.6	10.3	15.0	20.0	23.0	22.6	18.0	12.2	6.4	2.2	11.3
	Kura depression	3.5	4.6	8.1	13.7	19.1	24.4	27.1	26.7	22.2	16.2	9.7	5.0	15.0
	northeastern of Lesser Caucasus	0.2	0.7	4.3	9.9	14.1	18.6	21.4	21.3	17.1	11.6	6.2	2.0	10.6
	south and east of Lesser Caucasus	0.2	1.1	5.1	11.2	16.1	21.1	23.8	23.3	18.9	12.8	6.4	1.9	11.8
	Nakhchivan	–3.0	–0.2	5.5	11.9	16.5	21.8	25.3	25.2	20.6	13.7	6.4	–0.1	12.0
	Lankaran	2.8	3.0	6.0	11.3	16.8	20.7	24.6	22.9	20.3	14.0	8.7	4.6	12.7
2011–2022	Absheron water area	5.8	5.6	7.7	12.1	18.6	24.1	26.8	27.0	23.1	17.2	11.2	7.5	15.6
	northeastern of Greater Caucasus	–0.5	0.0	3.1	8.6	14.1	18.6	20.5	20.1	15.6	10.2	4.3	1.0	9.6
	South, southeast of Greater Caucasus	1.6	2.3	5.7	11.0	16.9	22.0	24.2	24.0	19.0	12.6	6.6	2.9	12.4
	Kura depression	4.3	5.6	9.0	14.3	20.7	26.0	28.0	27.5	23.0	16.4	9.8	5.4	15.8
	northeastern of Lesser Caucasus	1.6	2.0	5.8	10.8	16.0	20.6	22.9	22.5	18.0	11.8	6.2	2.3	11.7
	south and east of Lesser Caucasus	0.9	1.9	6.1	11.4	17.7	22.3	24.5	23.6	19.2	12.6	6.0	2.2	12.4
	Nakhchivan	–1.2	1.8	7.0	12.8	17.8	23.5	26.6	26.3	22.1	14.4	6.7	1.0	13.2
	Lankaran	3.8	4.0	7.1	11.7	17.2	22.1	24.1	23.7	19.8	14.1	8.4	4.8	13.4

The average annual air temperature indicators in the country is 13° C, 15.6° C in the Absheron water area of the Greater Caucasus region, 9.6° C in the northeastern regions of the Greater Caucasus province, 12.4° C in the south and southeast of the Greater Caucasus province, 15.8° C in the Kura depression province, 15.8° C in the northeast of the Lesser Caucasus province. It is 11.7° C, 12.4° C in the south

and east of Lesser Caucasus province, 13.2° C in Nakhchivan province, 13.4° C in Lankaran province. Seasonal indicators are different in 2011–2022 in the territory of Azerbaijan (Fig. 1). Thus, in winter, which is the coldest season, the air temperature is lower in the northeastern part of the Greater Caucasus province.

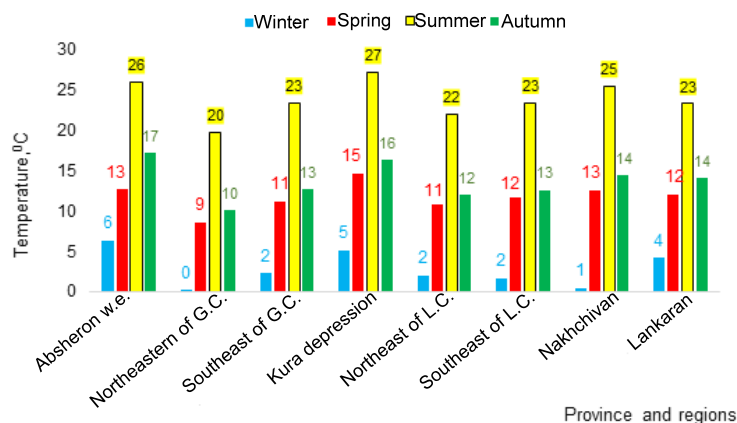


Fig. 1. Seasonal indicators of air temperature in physical-geographic provinces and regions

In this season, high temperature indicators are in the range of 5–6°C in the Kura depression province and Absheron water area. In spring, air temperature is higher in Kura depression and Nakhchivan province, Absheron physical-geographic region (13–15° C). In the summer season, higher temperature indicators are 25–27° C, in Absheron water area, Kura depression (Huseynov, Hajiye, Huseynov, 2023) and Nakhchivan province. This temperature indicator in autumn is about 14–17° C along the country, except of the northeastern regions of the Greater Caucasus (10° C) and Lesser Caucasus (13° C). In autumn,

lower temperature indicators in the north-east of the Greater Caucasus and in the Lesser Caucasus provinces are observed. The average air temperature in the country is 2–3° C in winter, 11–12° C in spring, 23–24° C in summer, and 13–14° C in autumn.

The study also paid attention to changes in air temperature in 2011–2022 compared to 1981–2010 (Fig. 2). Fluctuations in different months in the country show that the increasing air temperature in January (1.1° C), February (1.2° C), March (1.1° C), May (1.5° C), June (1.7° C), July (0.9° C) and August (0.9° C) is observed and is in the range of 0.9–1.5° C.

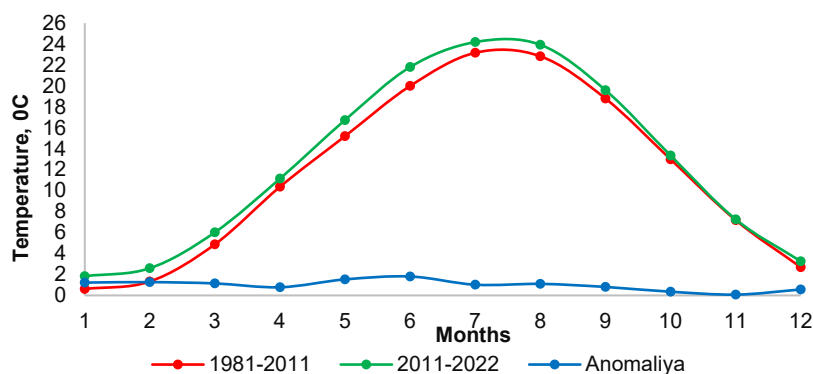


Fig. 2. Air temperature trend in Azerbaijan territory

In April and in September 0.7° C is noted, in October (0.3° C) and December (0.5° C) although less than 0.7° C, so there is no change in November (0.0° C). The increase in air temperature was higher in June (1.7° C). In these years, the 0.9° C increase in air temperature along the country is observed.

Seasonal anomalies show that the temperature increase was 0.9° C (0.6–1.6° C) in winter, 1.1° C (0.9–1.4° C) in spring, 1.2° C (0.8–1.5° C) in summer and 0.4° C (–0.1–0.4° C) in autumn. In winter, higher indicators were recorded in Nakhchivan (1.6° C), lower ones in the south and east of the Lesser Caucasus, Absheron water area (0.5–0.6° C). In spring, the maximum limits of the anomaly were in the north-eastern regions of the Greater and Lesser Caucasus provinces (1.4° C), and the minimum indicators were in the

south, east and Lankaran of the Lesser Caucasus (0.9° C). The temperature increase in the summer was 1.0–1.5° C in all regions, except of the south and east of the Lesser Caucasus (0.8° C). In autumn, the air temperature in the south and east of the Lesser Caucasus was slightly less than the climatic norm (0.1° C). The maximum increase in Nakhchivan province is observed up to 0.9° C. Higher temperature indicators the whole year were repeated in the highlands of the Greater Caucasus province, the north-east of the Lesser Caucasus and Nakhchivan.

Air temperature anomalies in individual stations in the 2011–2022 years compared to the climate norm (1981–2010) are given in the table (Tab. 2). If we pay attention to the table, it is possible to see that the air temperature has

increased in May and June at all stations during the last 11 years. The maximum indicators of these increases are 2–3° C in Kiriz, Khinalig, Guba, Gabala, Sheki, Oguz,

Zagatala, Mingachevir, Hadrut, Agstafa, Ganja, Paragachay stations. The analysis shows that higher temperature increases were observed in the low and mid-mountain zone.

Table 2

The temperature fluctuations in the hydrometrological stations (2011–2022)

№	Stations	Months												Y.
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
1	Kiriz	1.2	1.3	0.9	0.9	1.9	2.4	0.9	0.9	0.2	0.0	-0.4	0.5	0.9
2	Khinalig	1.9	1.3	1.6	1.6	3.1	2.8	2.1	1.6	1.3	0.9	0.6	0.4	1.6
3	Altıagach	1.4	1.0	0.7	0.8	1.7	1.5	0.8	1.4	1.1	0.2	0.1	0.5	0.9
4	Khaltan	0.6	1.5	1.0	1.1	2.1	1.4	1.3	0.4	0.6	0.1	0.0	0.3	0.9
5	Guba	1.0	1.0	1.1	1.0	2.3	2.1	1.2	1.5	0.7	0.4	0.1	0.8	1.1
6	Khachmaz	0.9	1.0	1.0	0.5	1.4	1.5	1.5	0.9	1.2	0.4	0.1	1.0	0.9
7	Mashtaga	0.7	0.9	0.9	0.5	1.6	1.7	1.2	0.7	1.0	0.5	0.1	0.7	0.9
8	Baku	0.7	1.0	1.0	0.7	1.7	1.7	1.1	1.1	0.9	0.2	-0.2	0.7	0.9
9	Chilov	0.7	0.6	0.6	0.5	1.4	1.5	0.9	0.8	0.5	0.2	0.0	0.3	0.7
10	Neft Dashlari	1.1	0.8	0.9	0.8	1.5	2.2	1.4	1.3	1.1	0.5	0.8	0.6	1.1
11	Sumqayit	0.8	0.9	0.7	0.9	1.6	1.5	1.2	1.0	0.9	0.6	0.0	0.8	0.9
12	Pirallahı	0.7	0.7	0.7	0.8	1.8	1.7	1.3	1.1	1.1	0.3	-0.2	0.5	0.9
13	Alibey	1.5	2.1	1.9	1.0	2.1	1.8	1.5	1.3	0.8	0.7	0.7	1.1	1.1
14	Gobustan	1.1	1.3	0.8	0.7	1.8	2.1	1.1	0.9	0.9	0.4	0.5	0.2	1.0
15	Shamakhi	1.2	0.8	0.5	0.4	1.5	1.6	0.7	1.2	0.5	0.3	-0.5	0.6	0.7
16	Gabala	1.5	1.4	1.1	1.1	2.2	2.2	1.5	1.9	1.4	0.7	0.3	1.0	1.4
17	Sheki	1.1	1.3	1.0	0.9	2.0	2.2	1.3	1.6	1.2	0.4	0.1	0.2	1.1
18	Oguz	1.5	1.4	1.4	1.0	2.0	2.5	1.7	2.0	1.5	0.6	0.5	0.9	1.4
19	Ismayilli	0.9	1.0	0.8	0.2	1.4	1.3	0.8	0.3	0.6	0.1	-0.3	0.9	0.7
20	Zagatala	1.1	1.4	1.1	0.8	2.1	2.3	1.3	1.8	1.2	0.3	0.5	0.6	1.2
21	Ceyrançöl	0.5	0.6	0.8	0.0	1.3	2.3	0.7	1.3	1.0	-0.1	0.2	-0.2	0.7
22	Tərtər	0.8	0.3	0.6	0.8	1.6	1.6	0.8	0.3	0.7	-0.4	0.0	-0.3	0.6
23	Goychay	0.8	0.9	1.0	0.5	1.7	1.6	0.9	0.9	0.9	0.3	0.1	0.4	0.8
24	Mingachevir	1.1	1.5	1.3	0.9	2.2	2.2	1.3	0.8	1.2	0.6	0.0	0.5	1.1
25	Bilasuvär	1.0	1.5	1.1	0.7	2.1	1.8	1.1	1.1	1.2	0.6	0.4	0.9	1.1
26	Barda	0.8	0.9	0.7	0.8	1.5	1.4	0.6	0.5	0.4	0.1	0.0	0.3	0.7
27	Beylagan	1.1	1.9	1.2	0.8	1.8	1.8	1.3	1.0	0.8	0.9	0.3	1.0	1.2
28	Yevlakh	0.5	1.0	0.9	0.4	1.6	1.7	0.7	0.7	0.8	0.3	0.1	0.1	0.7
29	Kurdamir	0.5	0.7	0.4	0.3	1.3	0.9	0.6	0.6	0.6	-0.2	-0.3	0.3	0.5
30	İmişli	0.9	1.1	1.0	0.7	1.6	1.4	0.9	0.8	0.8	0.0	0.1	0.6	0.8
31	Zardab	0.6	1.0	0.7	0.3	1.2	1.2	0.7	0.6	0.5	0.3	-0.4	0.4	0.6
32	Hacıgabalı	0.8	1.0	0.8	0.5	1.9	1.8	1.1	1.0	0.9	0.3	0.1	1.0	0.9
33	Jafarkhan	0.5	1.0	0.7	0.4	1.5	1.4	0.7	0.6	1.0	0.0	0.1	0.9	0.7
34	Salyan	0.7	1.1	0.7	0.7	1.8	1.5	1.1	0.8	0.5	0.3	0.1	0.8	0.9
35	Neftçala	0.9	1.1	0.8	0.7	1.7	1.7	1.3	0.9	0.8	0.2	0.0	0.7	0.9
36	Dashkasan	0.9	1.5	1.1	0.7	1.8	2.1	1.4	1.4	1.5	0.5	-0.3	0.8	1.1
37	Goygol	3.0	2.0	3.3	1.4	2.1	1.6	1.8	1.7	0.9	-0.8	-0.7	-0.2	1.3
38	Gadabay	1.4	1.3	0.9	0.5	1.4	1.5	0.8	0.7	0.8	0.3	0.1	0.2	0.8
39	Shamkir	0.8	0.8	1.2	0.6	1.7	1.8	1.3	0.9	0.9	0.2	0.1	-0.3	0.8
40	Agstafa	1.4	0.9	1.3	1.4	2.0	2.9	2.2	1.1	0.8	0.6	0.7	0.8	1.3
41	Ganja	1.1	1.2	1.1	0.8	2.0	2.1	1.3	1.0	0.6	0.0	0.3	0.4	1.0
42	Istisu	0.7	-0.3	0.3	0.6	1.0	0.9	0.1	0.2	0.4	-0.4	-0.8	-0.3	0.2
43	Shusha	0.8	-0.6	0.6	0.4	1.4	1.0	0.6	0.5	0.6	-0.2	-0.6	-0.5	0.3
44	Lachin	0.7	-0.7	0.2	0.5	1.2	0.9	0.2	0.2	0.3	-0.6	-1.2	-0.6	0.1
45	Khankendi	0.6	-0.7	0.5	0.4	1.4	1.1	0.6	0.6	0.6	-0.3	-0.7	-0.5	0.3
46	Hadrut	1.1	0.5	0.9	2.0	2.0	0.2	-0.4	-0.9	-0.2	-0.9	-0.3	0.6	0.4
47	Jabrayil	0.7	-0.7	0.5	0.4	1.6	1.0	0.5	0.5	0.6	-0.3	-0.7	-0.5	0.3
48	Asgaran	0.8	-0.7	-0.5	0.3	1.7	1.2	-0.1	0.4	0.8	-0.3	-0.4	-0.4	0.2
49	Fuzuli	0.5	-0.8	0.5	0.4	1.4	1.1	0.4	0.4	0.5	-0.3	-0.7	-0.4	0.2
50	Agdara	1.7	-0.1	-0.6	0.9	1.9	0.5	-0.5	0.1	0.3	-0.4	-0.4	0.1	0.3
51	Adam	0.5	-0.6	0.4	0.3	1.4	1.0	0.5	0.4	0.5	-0.3	-0.7	-0.5	0.2
52	Khojavand	0.7	-0.7	0.5	0.4	1.4	1.1	0.5	0.4	0.5	-0.2	-0.4	-0.3	0.3
53	Minjivan	0.7	-0.7	0.6	0.3	1.3	1.0	0.4	0.3	0.4	-0.2	-0.6	-0.5	0.2
54	Astara	0.8	1.0	1.3	0.7	1.5	1.5	1.0	0.8	0.9	0.4	0.0	0.6	0.9
55	Lankaran	0.9	1.1	0.8	0.5	1.3	1.3	0.6	0.5	0.7	0.2	-0.1	0.3	0.7
56	Goytepe	0.7	0.6	0.9	0.5	0.8	1.2	0.9	0.9	0.7	-0.1	-0.2	0.3	0.6
57	Yardimli	1.0	1.0	1.3	0.5	1.4	2.0	1.4	1.0	0.7	0.2	-0.5	0.4	0.9
58	Lerik	1.1	1.0	0.8	0.5	1.7	1.6	0.8	0.9	1.3	0.3	-0.8	-0.3	0.7
59	Kalvaz	1.6	1.2	1.1	-0.1	1.4	0.8	0.9	0.6	0.5	-0.3	-0.7	-0.5	0.5
60	Paragachay	2.3	2.7	3.2	2.1	2.6	3.0	2.4	1.7	1.9	1.6	0.8	2.9	2.3
61	Shahbuz	0.9	1.1	0.2	-0.4	0.5	1.1	0.4	0.4	0.4	-0.8	-1.1	-0.4	0.2
62	Naxchivan	1.6	1.5	1.6	0.8	1.1	1.7	1.7	1.2	1.2	0.0	-0.1	0.6	1.1
63	Ordubad	1.6	1.9	1.1	0.7	1.3	1.9	1.7	1.8	2.4	0.8	0.7	0.8	1.4
64	Sharur	2.5	2.1	1.3	1.0	1.1	1.4	0.8	0.7	1.2	1.1	0.3	0.5	1.2
65	Julfa	1.6	2.5	1.1	1.2	1.0	1.1	0.9	0.6	1.9	1.6	1.4	2.0	1.4
	Country	1.0	0.9	0.9	0.7	1.6	1.6	1.0	0.9	0.9	0.2	-0.1	0.4	0.8

In all remaining stations, the increase in air temperature was around 1–2° C in May and June. The second highest phase of air temperature increase was registered in January. So, although there is a slight increase in Khaltan, Kurdamir, Zardab, Yevlakh, Jeyranchol, Aghdam, Fuzuli, Khankendi, Jafarkhan (0.5–0.6° C), the limit of increase in other stations rises to 0.7–3.0° C. In February, in some stations (Alibey, Beylagan, Goygol, Paragachay, Ordubad, Sharur, Julfa), the temperature increase was 2–3° C. The analysis shows that the stations where the air temperature increases more in the winter months are located in Nakhchivan province, low and mid-mountains areas.

In 2011–2022, low indicators of air temperature anomalies were recorded in October and November. Thus,

in these months, the highest anomaly index was not higher than 1.6° C (Paragachay, Julfa). During these months it was even observed that the air temperature was slightly below than the climatic norm in others stations.

Besides, air temperature anomalies in altitude belts along the country were investigated in the study (Fig. 3). The analysis shows that the highest temperature increase in the territory of the country was recorded in 2001–2500 m altitude (1.3° C). At the altitude zone of 501–1000 m and 1501–2000 m, this indicator is 1.0° C. This indicator does not exceed 0.8° C at an altitude of 0–500 m (also below sea level) and 1001–1500 m.

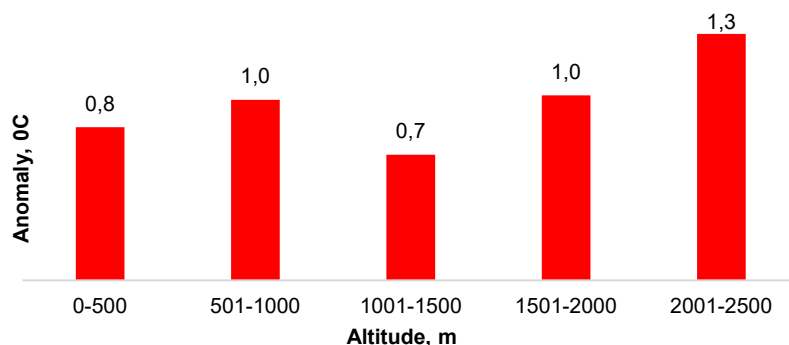


Fig. 3. Anomaly of air temperature by altitude in Azerbaijan territory

In order to analyze the trend of air temperature in 2011–2022 by territory compared to 1981–2010, the temperature distribution was given by applying the IDW model of interpolation in the GIS (Geographic Information Systems) environment (Fig. 4).

If we pay attention to the map, the Kura-Araz lowland, Absheron Peninsula, Arazboyu plains, Lankaran lowland are with higher, Greater and Lesser Caucasus, Talysh mountains and the highlands of their ridges are with lowest air temperature aerals (Huseynov, & Ismailova, 2023; Huseynov, & Huseynov, 2022; Nasibova et al., 2023). Analyzes in GIS technology show that in the country in 1981–2010, high air temperature indicators prevailed in

smaller areas, more precisely, in zones up to 500 m, compared to 2011–2022. In 2011–2022, high temperature indicators, i. e. 15° C and above, have shifted slightly higher (Gulmammadov, Mammadova, & Tagiyev, 2022). This shift manifests itself in the higher parts of the lowland. Thus, temperature fluctuations were determined at an altitude of 2001–2500 m, where long-term hydrometeorological measurements were made.

The analysis of anomaly indicators in the territory of Azerbaijan attracts interest in how the air temperature changes in the long term. Air temperature trends during 1961–2022 were viewed as 10-year periods (Fig. 5).

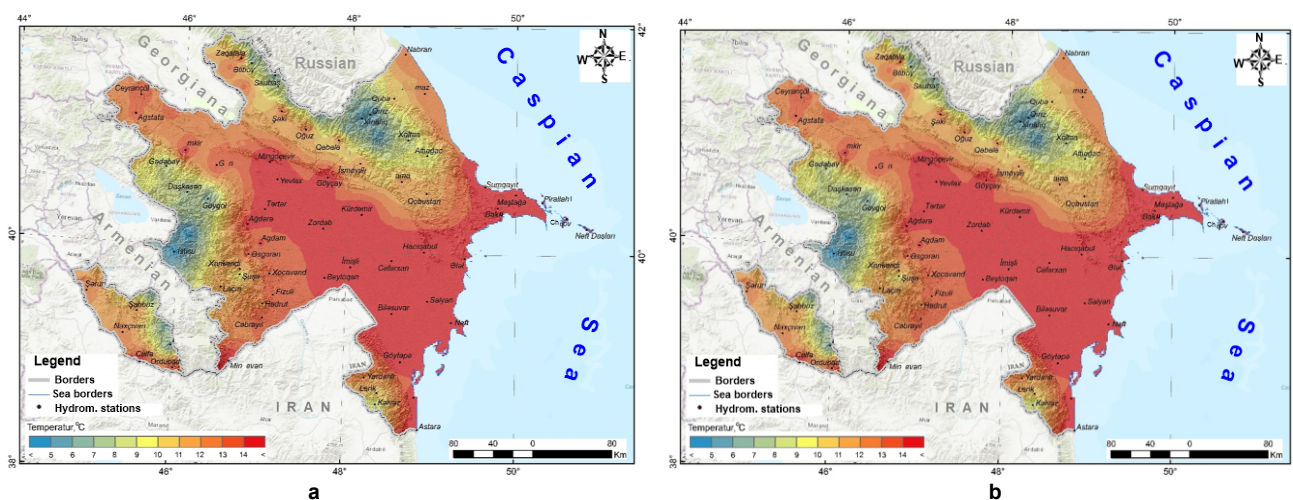


Fig. 4. Map of air temperature in the territory of Azerbaijan in 1981–2010 (a) and 2011–2022 (b)

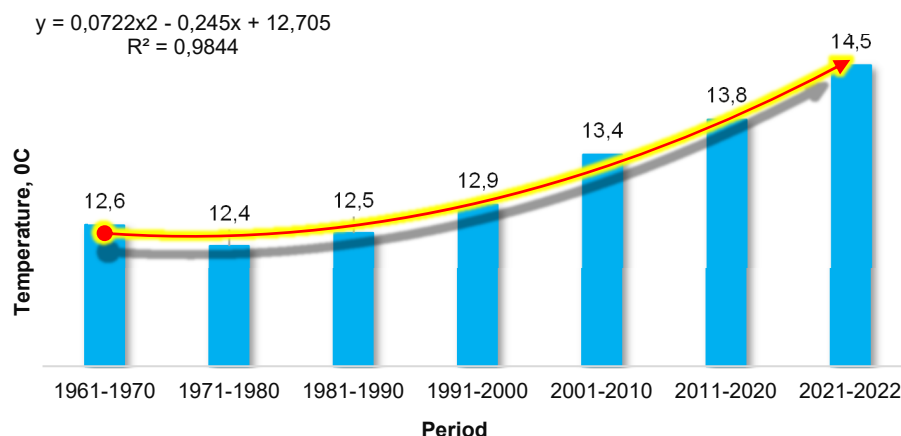


Fig. 5. Trend of air temperature in the territory of Azerbaijan by decades

If we pay attention to the multi-year dynamics of temperature, starting from 1961–1970, compared with previous decade, the temperature of the country decreased by 0.2° C (-0.024° C/1 year) in 1971–1980. In 1981–1990, this indicator increased by 0.1° C (0.015° C/1 year), in 1991–2000 by 0.4° C (0.032° C/1 year), in 2001–2010 by 0.5° C (0.057° C/1 year), in 2011–2020 by 0.4° C (0.040° C/1 year), and in 2021–2022 by 0.7° C (0.062° C/1 year). The highest temperature increase in decadal periods occurred in 2001–2010. In 2010, the increase in air temperature along the country reached a record level. This record is updated every year from 2016 to 2023. The temperature observed in the country in the last 7 years has been a new record every year since 1881.

Discussion and conclusions

As a result of the comparative analysis of air temperature in 2011–2022 compared to 1981–2010 in the territory of Azerbaijan, the following results were obtained:

1. The air temperature in the territory of Azerbaijan increased by 0.9° C in 2011–2022. This indicator was 0.9° C in winter, 1.1° C in spring, 1.2° C in summer and 0.4° C in autumn.
2. The highest increasing rate was 1.6° C in May and June.
3. The highest indicator of temperature anomaly was recorded at an altitude of 2001–2500 m.
4. The highest temperature increase in the long-term period was 0.5° C in 2001–2010. This indicator reached 0.7° C in 2021–2022.

The influence of climate changes in the air temperature regime in the territory of Azerbaijan will lead to the disruption of the traditional climate regime, the disappearance of the green landscape and expansion of semi-desert and arid landscape in the front mountainous areas, the increase of possible evaporation and the increasing of environmental crises such as drought at the 1000 m elevations. An increase in the radiation balance in Nakhchivan province may worsen the continentality of the climate type here. The increase in temperature in the Kura depression province will create conditions for the expansion of the semi-desert-arid climate in the piedmonts of the Greater Caucasus Mountains. Replacement of the snowing climate to a higher altitude (15 m / 1 year), melting of permanent glaciers creates conditions for the lack of drinking water, accelerates the decrease in the level and volume of underground water sources.

At the same time, the results of the study show that the hydrometeorological elements and manifestations should be re-examined such as solar radiation, albedo, precipitation, glacier volume, river and groundwater flow balance, wind, radiation balance, etc. The results of the increase in air temperature should

be taken into account in new designs in tourism, energy, agriculture, construction industry. Thus, it is possible to increase the use of solar energy as an alternative energy source within the framework of mitigation measures in the country.

Authors' contribution: Jamal Huseynov – conceptualization, methodology, writing (original draft), formal analysis; Allahverdi Tagiyev – data validation, writing (review and editing).

References

- Abdullayev, P. A., & Rzayev, V. R. (2023). Issues of regulation and management of water use in Azerbaijan against the background of global climate changes. *Materials of the scientific-practical conference on "The development of the water sector of Azerbaijan is connected with the name of the national leader Heydar Aliyev"*, Baku (p. 444–447) [in Azerbaijani]. [Abdullayev, P. A., & Rzayev, V. R. (2023). Qlobal iqlim dəyişmələri fonunda Azərbaycanı sudan istifadənin tənzimlənməsi və idarəedilməsi məsələləri. *Materials of the scientific-practical conference on "The development of the water sector of Azerbaijan is connected with the name of the national leader Heydar Aliyev"*, Baku (p. 444–447)].
- Ahmadov, N. N. (2023). Ecological impact of climate changes. *Materials of the scientific-practical conference on "The development of the water sector of Azerbaijan is connected with the name of national leader Heydar Aliyev"*, Baku (p. 414–416) [in Azerbaijani]. [Əhmədov, N.N. (2023). İqlim dəyişikliklərinin ekoloji təsiri. *Materials of the scientific-practical conference on "The development of the water sector of Azerbaijan is connected with the name of national leader Heydar Aliyev"*, Baku (p. 414–416)].
- Annual meteorological station data. (2020). State Statistics Committee. <https://stat.gov.az/source/environment>
- Goddard Institute for Space Studies. (2023). National Aeronautics and Space Administration. <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>
- Gulmammadov, C. Ch., Mammadova, M. A., & Tagiyev, A. Sh. (2022). Hydrogeological conditions of the Shirvan steppe of Azerbaijan. *Reliability: Theory & Applications*, 17(SI 4(70)), 274–281. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-470-274-281>
- Huseynov, N. Sh., Hajiyev, A. Kh., & Huseynov, C. S. (2023). Assessment of the effects of climate changes on desertification in the Kura-Araz plain. *Water problems, Science and Technologies*, 1(21), 54–67 [in Azerbaijani]. [Hüseynov, N. Ş., Hacıyev, A. X., & Hüseynov, C. S. (2023). İqlim dəyişmələrinin Kür-Araz ovalığında səhralaşmaya təsirlərinin qiymətləndirilməsi. *Water problems, Science and Technologies*, 1(21), 54–67].
- Huseynov, J. S., & Ismayilova, N. N. (2023). Modern distribution characteristics of air temperature in Lankaran province. *Modern problems of Geography: integration of science and education" dedicated to the 100th anniversary of National Leader Heydar Aliyev*, Baku (p. 159–168) [in Azerbaijani]. [Hüseynov, C. S., & İsmayilova, N. N. (2023). Lənkəran vilayətində hava temperaturunun müasir paylanma xüsusiyyətləri. *International scientific-practical conference "Modern problems of Geography: integration of science and education" dedicated to the 100th anniversary of National Leader Heydar Aliyev*, Baku (p. 159–168)].
- Huseynov, J. S. (2020). Features of the distribution of the multi-year temperature regime on the territory of Azerbaijan. *Hydrometeorological researches and forecasts*, 4, 110–116 [in Russian]. [Гусейнов, Д. С. (2020). Особенности распределения многолетнего температурного режима на территории Азербайджана. *Гидрометеорологические исследования и прогнозы*, 4, 110–116].
- Huseynov, N. Sh., & Huseynov, J. S. (2022). Distribution of the Contemporary Precipitation Regime and the Impact of Climate Change on it within the territory of Azerbaijan. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 12(4), 1000254, 1–7.

Kazimova, S. E. (2015). Climate changes and anthropogenic impact on rivers. *Materials of the Republican scientific-practical conference on "Geography: theory, practice and innovation", Baku* (p. 608–612) [in Azerbaijani]. [Kazimova, S. E. (2015). *Çaylarda iqlim dəyişmələri və antropogen təsir. Materials of the Republican scientific-practical conference on "Geography: theory, practice and innovation", Baku* (p. 608–612)].

Mahmudov, R. N. (2022). Regional climate changes and dangerous hydrometeorological phenomena in Azerbaijan. National Aviation Academy [in Azerbaijani]. [Mahmudov, R. N. (2022). *Azərbaycanda regional iqlim dəyişmələri və təhlükəli hidrometeoroloji hadisələr*. National Aviation Academy].

Mammadov, R. M. (2015). *Geography of the Republic of Azerbaijan*. Physical Geography [in Azerbaijani]. [Mammadov, R. M. (2015). *Azərbaycan Respublikasının Coğrafiyası*. Physical Geography].

State Land and Mapping Committee. (2014). *National Atlas of the Republic of Azerbaijan* [in Azerbaijani]. [State Land and Mapping Committee. (2014). *Azərbaycan Respublikasının Milli Atlası*].

Nasibova, G. J., Mukhtarova, Kh. Z., Ganbarova, Sh. A., Zeynalova, S. A., & Ismayilova, M. M. (2023). The influence of compressive stresses on folding

in the Middle Kura depression and the Turkmen shelf. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 32(2). <https://doi.org/10.15421/112332>

Fel, O. (2023). Attribution of extreme events to climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, 48, 813–828.

Rzaeva, S. M., Guseynov, J. S., & Tagiyev, A. Sh. (2023). Assessment of the impact of climate change on the precipitation regime in the southern slope of the Greater Caucasian province. *Reliability: Theory & Applications*, 18(SI 5(75)), 404–410. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2023-575-404-410>

Rzaeva, S. M., Tagiyev, A. Sh., & Zeynalova, S. A. (2022). Impact of climate change on the groundwater of the Ganikh-Ayrichay foothills. *Reliability: Theory & Applications*, 17(SI 4(70)), 180–187. <https://doi.org/10.24412/1932-2321-2022-470-180-187>

Richard, G. T., & Bridget, S. et al. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3, 322–329.

Thomas, D., Rachael, L. Sh., & Cameron, T. W. (2020). Climate Change and Society. *Annual Review of Sociology*, 46, 135–158.

Отримано редакцією журналу / Received: 18.02.24

Прорецензовано / Revised: 09.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Джамал ГУСЕЙНОВ, наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0002-7878-578X

e-mail: camal_huseynov_88@mail.ru

Аеропорт Забрат, Баку, Азербайджанська Республіка

Аллахверді ТАГІЄВ, наук. співроб.

ORCID ID: 0000-0001-5526-3631

e-mail: allahverdi.taghiyev@gmail.com

Азербайджанський державний університет нафти та промисловості, Баку, Азербайджанська Республіка

ХАРАКТЕРИСТИКА ВПЛИВУ ЗМІН КЛІМАТУ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВІТРЯ НА ТЕРИТОРІЇ АЗЕРБАЙДЖАНУ В ПЕРІОД ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Вступ. У дослідженні було використано дані спостережень за температурою повітря за 1981–2022 рр. близько 70 гідрометеорологічних станцій, що діють на території Азербайджанської Республіки. З метою визначення впливу змін клімату на температурний режим повітря проведено порівняння результатів 1981–2010 рр. з відповідними результатами 2011–2022 рр.

Методи. У дослідженні за допомогою математичних, статистичних і картографічних методів розглянуто тренд місячних, сезонних і багаторічних змін температури повітря.

Результати. Дослідження показують, що температура повітря в країні підвищилася на 0,9° С. Позитивна аномалія досягла 1,3° С на поясі з висотою 2001–2500 м. Основні високі показники відзначені у високогірних районах. Температурна аномалія коливається в межах 1,5–1,7° С, переважно в травні та червні місяці. Багаторічна динаміка температури показує, що у 2001–2010 рр. спостерігається підвищення температури (0,057° С / 1 рік). Це був найтепліший період протягом 1961–2022 рр.

Результати дослідження можуть бути використані для захисту від змін клімату, пом'якшення наслідків та вивчення сучасного температурного режиму. Крім того, сонячне випромінювання можна використовувати як альтернативне джерело енергії на рівнинних ділянках, де спостерігаються високі показники температури повітря. Про отримані результати буде повідомлено на конференції зі зміни клімату COP 29 (Конференції сторін), яка пройде в Баку 11–22 листопада 2024 р.

Висновки. Вплив кліматичних змін на температурний режим повітря на території Азербайджану призведе до порушення традиційного кліматичного режиму, зникнення зелених ландшафтів і розширення напівпустельних і посушливих ландшафтів у передових гірських районах, можливе збільшення випаровування та посилення екологічних криз, таких як посуха на висоті 1000 м. Підвищення радіаційного балансу в Нахичеванській області може погіршити тут континентальність клімату. Підвищення температури у провінції Куринської западини створить умови для поширення напівпустельно-посушливого клімату в передгір'ях Великого Кавказу.

Ключові слова: математичні, статистичні та картографічні методи, температурні показники, парниковий ефект, рівнинні території, альтернативне джерело енергії, кліматична норма, висотна зона, ArcGIS.

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

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

УДК 556.3:[553.9(622.3)]
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.11>

Олександр НІМЕЦЬ¹, наук. співроб.
e-mail: muhtarok14@gmail.com

Дмитро НІМЕЦЬ¹, канд. геол. наук, провід. наук. співроб.
e-mail: dmitrynemets@gmail.com

Дмитро ЧОМКО², канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-8454-5531
e-mail: Chomko@knu.ua

Ігор УДАЛОВ³, д-р геол. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0003-3844-6481
e-mail: Igorudalov8@gmail.com

¹Український науково-дослідний інститут природних газів, Харків, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

³Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ І ТЕРМОБАРИЧНИХ УМОВ ВАЛЮХІВСЬКОГО НАФТОГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Вступ. Нині практичними завданнями нафтогазової геології є пошуково-розвідувальні роботи, освоєння надр, розробка нафтових і газових родовищ та багато інших, пов'язаних з великим колом суміжних наук, таких як техногенне навантаження на геологічне середовище, екологічні та гідрогеологічні питання впливу нафтогазових родовищ на питні води тощо. У пропонованій роботі розглянуто гідрогеологічні та термобаричні умови Валюхівського нафтогазоконденсатного родовища (НГКР), що розміщене в зоні зчленування північної прибортвової зони і центральної приосьової зони Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ).

Методи. Пропонований методичний підхід ґрунтується на теоретичних уявленнях, що регіональні геотермічні аномалії можуть утворюватися лише вуглеводневими (метановими) газами внаслідок їхньої вертикальної міграції. Отже, пріоритетними є пошуки ділянок у межах нафтогазоносних басейнів, які внаслідок дії певних факторів (неотектонічні рухи тощо) характеризуються підвищеними значеннями геотемпературного поля. На наступному етапі визначаємо гідрогеологічні умови розрізу, досліджуємо їхній зв'язок з нафтогазоносністю регіону. Надалі з'ясовуємо газогеохімічні умови розрізу, встановлюємо зв'язки компонентного складу вільних газів з глибиною і сучасними пластовими температурами.

Результати. Валюхівське НГКР з позиції гідрогеології цікаве тим, що у його розрізі у межах нижнього гідрогеологічного поверху набуває розвитку термодегідратаційна гідрогеологічна зона та пов'язані з нею явища – аномально високі пластові тиски тощо. Крім того, термодегідратаційна зона тут є не тільки величезною зоною міграції вуглеводнів, а ще й містить їхні промислові скупчення у відкладах турнейського та фаменського ярусів.

Висновки. На підставі проведеного аналізу було встановлено, що катагенетичний флюїдоупор (КФУ) в розрізі родовища залягає в інтервалі глибин 4,6–5,0 км та має неоднорідність нижнього гідрогеологічного поверху. Виділено дві гідрогеологічні зони: верхня – елізійна, розповсюджена в частині розрізу над КФУ, нижня зона – термодегідратаційна, набуває розвитку в частині розрізу під КФУ. Продуктивні горизонти Валюхівського НГКР відомі як у межах елізійної гідрогеологічної зони (ЕГЗ), так і в межах термодегідратаційної гідрогеологічної зони (ТДГЗ).

Ураховуючи отримані дані, можемо стверджувати, що геологічна обстановка глибоких горизонтів Валюхівського НГКР родовища сприяє не лише вертикальній міграції вуглеводнів (ВВ) у межах ТДГЗ, а й накопиченню їх у промислових масштабах.

Ключові слова: Валюхівське нафтогазоконденсатне родовище, Дніпровсько-Донецька западина, гідрогеодинамічні системи, елізійна гідрогеологічна зона, термодегідратаційна гідрогеологічна зона, аномально високі пластові тиски, катагенетичний флюїдоупор.

Вступ

Практичними завданнями нафтогазової геології нині є пошуково-розвідувальні роботи, освоєння надр, розробка нафтових і газових родовищ і багато інших, пов'язаних з великим колом суміжних наук. Це і техногенне навантаження на геологічне середовище (Удалов, 2016), й екологічні та гідрогеологічні питання впливу нафтогазових родовищ на питні води (Levoniuk et al., 2019; Решетов, Чомко, Ф., & Чомко, Д., 2004), і, навіть – економічні питання (Чомко, & Рева, 2017 та ін.).

Одним із пріоритетних напрямків нафтогазової геології і гідрогеології є відкриття та застосування нових методичних підходів до пошуку вуглеводневих скупчень. Один з таких підходів був розглянутий у дисертаційній роботі (Німець, Д., 2014), де запропоновано нову методику оцінювання нафтогазоносних басейнів та їхніх окремих структурно-тектонічних регіонів на основі обраного комплексу пошукових критеріїв – гідрогеологічного, термобаричного, газогеохімічного. У світлі синергетичної парадигми, представлена методика спрямована на розвиток загального методологічного напрямку на межі відразу цілого кола геологічних наук – геології нафти та газу, нафтогазової гідрогеології тощо.

Методи

Новий методичний підхід ґрунтується на теоретичних уявленнях, що регіональні геотермічні аномалії можуть утворюватися лише вуглеводневими (метановими) газами внаслідок їхньої вертикальної міграції. Отже, пріоритетними є пошуки ділянок у межах нафтогазоносних басейнів, які внаслідок дії певних факторів (неотектонічні рухи тощо) характеризуються підвищеними значеннями геотемпературного поля. Зважаючи на це, згідно з новою методикою на першому етапі досліджують геотермічні умови обраного регіону, визначають позитивні геотермічні аномалії, що окреслюють горизонтальні ділянки з інтенсивним тепломасоперенесенням вуглеводневих (метанових) газів. Також вивчають геобаричні умови розрізу, при цьому аномально високі пластові тиски, маючи єдиний із геотермічними аномаліями генезис, розглядають як ознаку висхідної міграції вуглеводнів, і – відповідно, як пошуковий критерій.

На наступному етапі визначають гідрогеологічні умови розрізу, досліджують їхній зв'язок з нафтогазоносністю регіону. Вивчення хімічного складу підземних вод дає змогу встановити неоднорідність гідрогеологічної будови обраного регіону і виділити самостійні гідрогеологічні зони. Першочергової уваги потребує гідрогеологічна

© Німець Олександр, Німець Дмитро, Чомко Дмитро, Удалов Ігор, 2024

зона розвитку седиментогенних розсолів із прямою гідрогеологічною зональністю, що пояснюється багатьма позитивними моментами. Тут розвинена система регіональних флюїдоносних комплексів і флюїдоупорів. Гідрогеологічна закритість розрізу сприяє збереженню вуглеводневих покладів, що часто залягають на відносно невеликих глибинах. Вивчення основного та мікрокомпонентного складу підземних вод залежно від глибини та сучасних пластових температур дає змогу прослідити зв'язок гідрогеологічних умов зі встановленою промисловою нафтогазоносністю регіону.

Надалі з'ясовують газогеохімічні умови розрізу, встановлюють зв'язки компонентного складу вільних газів із глибиною і сучасними пластовими температурами. Визначають глибинні та температурні межі існування вуглеводнів, досліджують структуру розміщення вуглеводневих покладів у геотемпературному полі. Такий методичний підхід дає змогу виділити вертикальні частини розрізу, приурочені до певних інтервалів глибин і пластових температур, у межах яких доцільно сконцентрувати зусилля з подальшого пошуку скопчень вуглеводнів.

Зазначений методичний підхід будемо використовувати для аналізу великого структурно-тектонічного регіону – північного борту та північної прибортової зони ДДЗ, виділення в його розрізі температурних інтервалів і частин розрізу, що є перспективними з позиції пошуків скопчень вуглеводнів. Отже, надана у пропонованій статті гідрогеологічна та термобарична оцінка Валюхівського нафтогазоконденсатного родовища є початком досить тривалої наукової роботи, яку будуть виконувати наукові співробітники УкрНДІгазу.

Отже, пріоритетними цілями цієї статті є:

- дослідити гідрогеологічні та термобаричні умови Валюхівського НГКР;

- на підставі вивчення гідрогеологічних і термобаричних умов встановити неоднорідність нижнього гідрогеологічного поверху, визначити глибинні інтервали залягання КФУ, виділити елізійну та термодегідратаційні гідрогеологічні зони.

Наукова та практична проблема полягає в тому, щоб охопити такими дослідженнями всю ДДЗ, як у площинному, так і в глибинному сенсі. Подібні роботи для південного борту та південної прибортової зони були проведені Д. Німцем (Німець, Д., 2014). Майбутні дослідження для північного борту та північної прибортової зони будуть частиною загальної наукової проблеми.

Нагадаємо, що за сучасними гідрогеологічними уявленнями про гідрогеологічну будову осадових басейнів дослідниками (Карцев, 1963; 1980; Колодій, & Нудик, 1980; Капченко, 1983; Терещенко, 1987, 2001; Заріцький, & Зіненко, 1991 та ін.) переважно виділяються гідрогеологічні (гідродинамічні) поверхи за ознаками розвитку у їхніх межах гідродинамічних систем (ГГДС). Одним з перших генетичну класифікацію ГГДС запропонував О. Карцев, який виділив інфільтраційні й елізійні системи, що було основою вивчення осадових басейнів у 60–70-ті роки ХХ ст. (Карцев, 1963). Накопичення даних глибинного буріння показало, що за своєю будовою нижній гідрогеологічний поверх є неоднорідним, тому В. Терещенко (Терещенко, 1987) та деякі інші дослідники для давніх палеозойських платформ і внутрішніх прогинів (до яких належить і ДДЗ) виділили постелізійні (вироджені) ГГДС, а В. Колодій запропонував виокремлювати, крім двох згаданих, ще й термодегідратаційну гідродинамічну систему (Колодій, 1980; Колодій, В., Колодій, І., & Маєвський, 2009).

Отже, за сучасними вертикальними гідрогеологічними зональностями виділяють два гідрогеологічні поверхи – верхній і нижній. У межах першого поверху розвинена

інфільтрогенна ГГДС. У межах нижнього гідрогеологічного поверху виокремлюють ЕГЗ та ТДГЗ, що отримали назви згідно з розвиненими у їхніх межах ГГДС.

Зуважимо, що автори пропонованої статті займаються широким колом гідрогеологічних питань, зокрема і нафтогазової гідрогеології. Це знаходить відображення як у їхніх наукових дослідженнях у межах тематики УкрНДІгазу, Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Київського національного університету імені Тараса Шевченка, так і в наукових публікаціях (Петін та ін., 2013 та ін.). О. Німець неодноразово брав участь у програмах Малої академії наук України (Німець, 2013; Німець, О., 2014), його науково-дослідні роботи також були пов'язані з гідрогеологією ДДЗ.

Результати

Скорочено розглядаючи гідрогеологічні умови Валюхівського НГКР, зазначимо, що в межах верхнього гідрогеологічного поверху виділяють ряд водоносних горизонтів, що містять прісні води з мінералізацією до 1,0 г/дм³, які використовують для питного та господарського водопостачання. Серед них можна виокремити палеогенові межигірсько-обухівський і буцацький водоносні горизонти, а також сеноман-нижньокрейдяний водоносний горизонт. Глибини залягання палеогенових горизонтів становлять, відповідно, 100,0–170,0 м та 215,0–255,0 м. Дебіти свердловин цих горизонтів досягають 120,0–240,0 м³/добу. Сеноман-нижньокрейдяний водоносний комплекс залягає на глибинах 1245,0–1316,0 м. За складом це переважно гідрокарбонатні натрієві води з мінералізацією до 1,0 г/дм³. Ця частина розрізу підлягає ретельній охороні від можливого забруднення у процесі буріння свердловин і розробки родовища.

Верхньокрейдяна глиниста товща є регіональним флюїдоупором, що розділяє верхній і нижній гідрогеологічні поверхи. Товщина флюїдоупору становить 350,0 м.

Як видно з розрізу, нижче залягають келовейський і байоський водоносні горизонти. Глибина залягання останнього з них досягає 1721,0–1800,0 м. Тут розвинені за хімічним складом хлоридні натрієві води. Показник їхньої мінералізації коливається в межах 50,0–80,0 г/дм³. Припливи з горизонту досягають 300,0 м³/добу і більше.

Верхня частина тріасових відкладів сформована переважно глинистими породами і є регіональним флюїдоупором. Нижче, на глибинах 2080,0–2460,0 м, залягає найбільш високодебітний тріасовий водоносний комплекс. Припливи води з нього досягають 600,0–1000,0 м³/добу. За хімічним складом пластові води – хлоридні натрієві, їхня мінералізація змінюється у межах 80,0–140,0 г/дм³. Тріасовий водоносний комплекс використовують для повернення супутньо-пластових вод.

Регіональний пермський флюїдоупор у межах Валюхівського родовища охоплює глинисту пересажську світу верхньої пермі, хомогенну товщу та картамишську світу нижньої пермі і має загальну товщину 400,0–450,0 м.

Водоносні горизонти, що є приуроченими до пісковиків верхнього карбону і московського ярусу середнього карбону, утворюють у розрізі родовища єдиний водоносний комплекс, який залягає в інтервалі глибин 3180,0–3666,0 м і вміщує окремі горизонти потужністю від 7,0–10,0 до 25,0–35,0 м. Припливи води із цих горизонтів коливаються від 2,0 до 250,0 м³/добу. Пластові води представлені розсолами хлоридного натрієвого складу, їхня мінералізація досягає 170,0–210,0 г/дм³.

Відклади башкирського ярусу представлені щільними породами.

Нижче за розрізом залягає нижньокам'яновугільний водоносний комплекс. На глибинах від 4180,0 до 4510,0 м

водоносні горизонти можна зустріти у верхньосерпховських відкладах. Товща, що містить водоносний горизонт, представлена шаруванням пісковиків, алевролітів й аргілітів. На Гадяцькому родовищі із цих горизонтів були отримані припливи води від 100,0 до 200,0 м³/добу. Пластові води за хімічним складом є хлоридні натрієві, їхня мінералізація досягає 190,0–220,0 г/дм³.

Продуктивні відклади верхньовізейського під'ярусу залягають в інтервалі глибин від 4600,0 до 5150,0 м і вміщують багато водоносних горизонтів, приурочених до пісковиків й алевролітів. Води цих горизонтів є законтурними щодо газових покладів. Найбільший приплив води був отриманий під час випробування свердловини 2 на Гадяцькому родовищі, він досяг 523,0 м³/добу за динамічного рівня 450,0 м. Мінералізація пластових вод верхньовізейських відкладів становить 197,0–281,0 г/дм³, за складом вони хлоридні натрієві.

Згадані водоносні комплекси і горизонти належать до елізійної гідрогеологічної зони нижнього гідрогеологічного поверху. Нижче за розрізом залягає перехідна зона, так званий катагенетичний флюїдоупор (КФУ), який у

ДДЗ зазвичай приурочений до температурного інтервалу 110,0–120,0 °С.

На існування такого флюїдоупору у ДДЗ першим звернув увагу В. Терещенко (Терещенко, 1987). Подальшого розвитку цей науковий погляд набув у наукових працях авторів моделі вертикальної зональності – О. Заріцького й І. Зіненка (Заріцький, & Зіненко, 1991). Розроблена вченими модель вертикальної гідрогеологічної зональності ґрунтується на тому, що чотири основні елементи осадової товщі – гірські породи, підземні води, розсіяна органічна речовина і вуглеводні – взаємодіють одне з одним під впливом єдиного літогенетичного процесу, тому визначальним фактором є пластова температура, представлена в земній корі конвективним теплопереносом.

За геотермічними умовами (рис. 1), представленими термограмою св. 1 Валюхівського нафтогазоконденсатного родовища, КФУ тут залягає приблизно в інтервалі глибин 4600,0–5000,0 м у нижній частині верхньовізейських відкладів. Під КФУ набуває розвитку ТДГЗ.

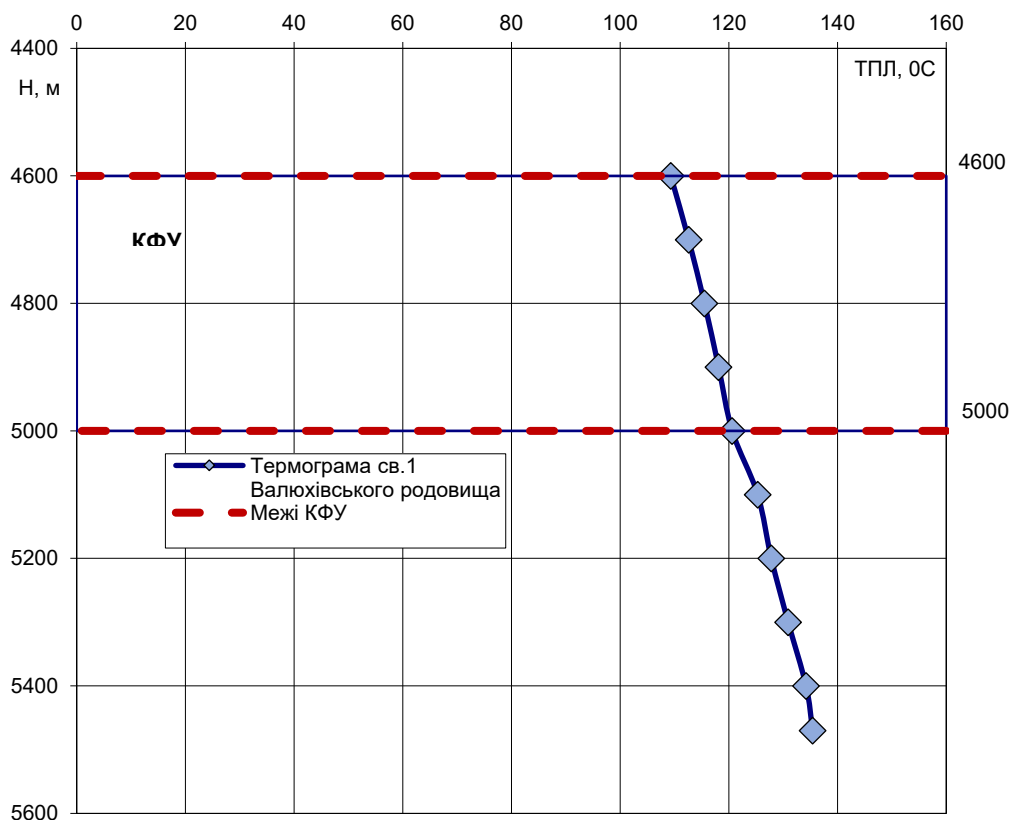


Рис. 1. Розподіл пластових температур у розрізі Валюхівського НГКР

Скорочено характеризуючи ТДГЗ, зауважимо, що тут в умовах пізнього катагенезу (стадії МК₃₋₅ і вище) докорінно змінюється структура порового простору колекторів, процеси елізійного віджимання глин закінчуються і змінюються процесами термодегідратації вже не порід, а мінералів – монтморилоніт переходить у гідрослюда (іліт). Вивільнення в процесі термодегідратації міжшарової води ("відродженої" за термінологією Л. Капченка (Капченко, 1983)), агресивної в хімічному сенсі, призводить до руйнування, розчинення, вилугування, а потім зі зниженням парціального тиску в розчині – вторинного перевідкладання, перекристалізації порід і мінералів

(насамперед карбонатів), наслідком чого є погіршення колекторських властивостей порід (Капченко, 1983). З вивільненням відроджених вод пов'язане існування гідрохімічних інверсій. Це явище зафіксоване на багатьох площах і родовищах ДДЗ – на Мачуській, Родниківській та ін. У межах північної прибортової зони існування гідрохімічної інверсії встановлено у водоносних горизонтах нижнього карбону Березівського родовища та деяких ін.

Даних про хімічний склад нижньовізейських пластових вод недостатньо, тому їхню характеристику наводимо з урахуванням даних щодо сусідніх площ. Статичні рівні у свердловинах встановлювали на глибинах 40,0–210,0 м;

спостерігалось винесення пластових хлоридних натрієвих вод густиною $1129,0 \text{ кг/м}^3$, мінералізацією $186,7 \text{ г/дм}^3$. Високометаморфізовані розсоли цих горизонтів збагачені мікрокомпонентами: йодом, бором, залізом, амонієм тощо. Пластові води також високонасичені вуглеводневими газами до $1200,0\text{--}1900,0 \text{ см}^3/\text{л}$. У компонентному складі водорозчиненого газу домінує метан.

Девонські відклади випробувані у свердловині 1, з якої одержано приплив води $43,0 \text{ м}^3/\text{доб}$. Мінералізація води становить $223,7 \text{ г/дм}^3$, густина – $1152,0 \text{ кг/м}^3$. За складом вона хлоридна натрієва.

Валюхівське нафтогазоконденсатне родовище, серед інших, цікаве декількома обставинами. По-перше, його структурне розташування зумовлює відносно неглибоке залягання фундаменту – $6,2\text{--}6,8 \text{ км}$. Це дає нагоду

оцінити можливий максимальний рівень аномально високого пластового тиску (АВПТ), пов'язаного з ТДГЗ. За нашими розрахунками, залишкова товща (різниця між глибинами залягання фундаменту і КФУ) дорівнює приблизно $1,5 \text{ км}$. Субвертикальне вуглеводневе скупчення такої висоти може мати під КФУ за густини води 1150 кг/м^3 надлишковий тиск, що дорівнює $13,43 \text{ МПа}$. Він додається до фонового гідростатичного тиску на рівні підшови КФУ ($53,05 \text{ МПа}$) і збільшує його до $66,48 \text{ МПа}$. Відношення $P_{\text{пл}}/P_{\text{г}}$ для цього значення становить $1,36$. Воно є максимально можливим для Валюхівського НГК родовища. На рис. 2 наведено значення пластового тиску у свердловині 3, з якої за допомогою пластовипробувача одержано приплив газу з пластовим тиском на глибині $5083,0 \text{ м}$, що дорівнює $65,7 \text{ МПа}$, а $P_{\text{пл}}/P_{\text{г}} = 1,32$.

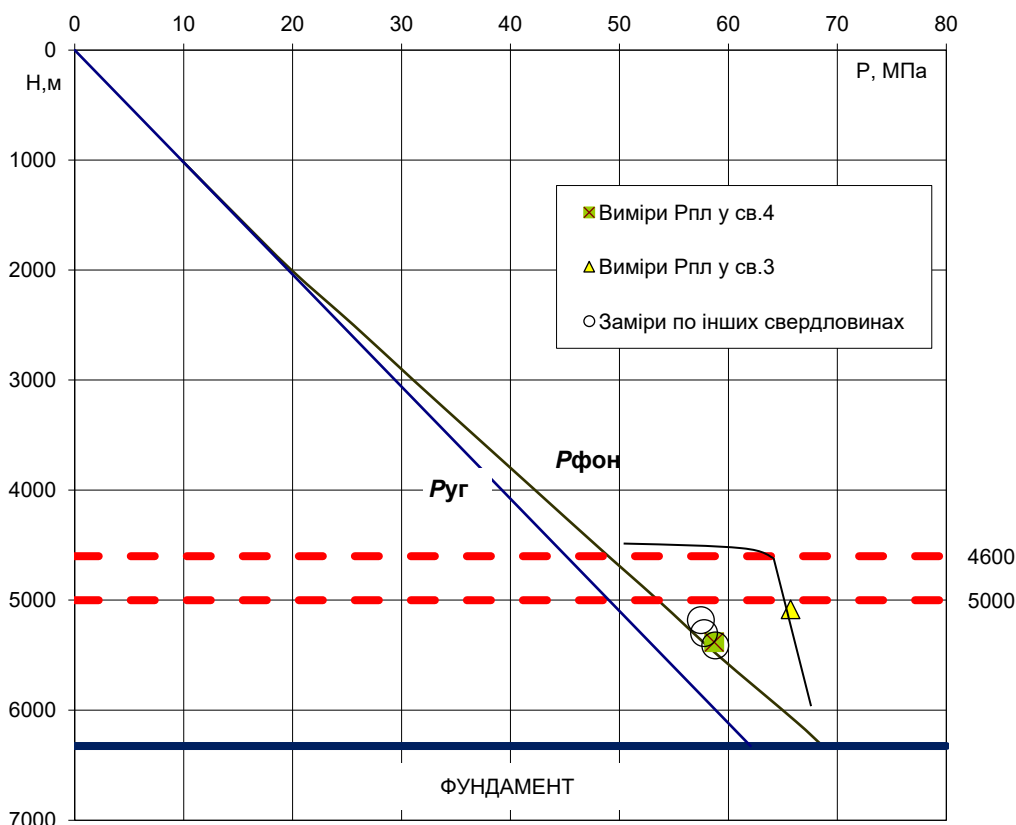


Рис. 2. Розподіл пластових тисків у розрізі Валюхівського НГКР

Отже, максимальний геобаричний потенціал надр Валюхівського родовища підтверджений фактичним виміром АВПТ у свердловині 3.

Автори статті не ставили собі за ціль вдаватися до проблеми генезису АВПТ. Цьому питанню були присвячені сотні публікацій у другій половині ХХ ст. (Карцев, 1980; Колодій, & Нудик, 1980; Терещенко, 1987; Новосілецький, 1969; Орлов, 1980; Осадчий, 1976 та ін.), зокрема і багатьох відомих українських науковців.

У роки існування України як незалежної держави питання генезису глибинних АВПТ, хоч і не так гостро, як раніше, але порушували в науковій літературі, зокрема й автори цієї роботи (Німець, О., 2014; Петін та ін., 2013; Німець, 2013; Німець, Д., 2014; Німець, 2008; Орлов та ін., 2007а; 2007б; Бенько та ін., 2013; Лукін, 2008; Кабишев та ін., 2011).

Необхідно підкреслити, що, по-перше, АВПТ як геологічне явище постійно перебувало і перебуває тепер у

центрі уваги закордонних геологів як у минулому сторіччі (Hast, & Nilson, 1958; Ferran, 1973; Hanson et al., 1990 та ін.), так і в нинішньому (Trick, 2003; Aplin, & Larter, 2005; Wu, & Bai, 2009; Song, 2015 та ін.).

По-друге, Валюхівське родовище цікаве ще й тим, що продуктивні горизонти в його розрізі встановлені, як у межах ЕГЗ (гор. В-15, глибини $4545,0\text{--}4673,0 \text{ м}$), так і в межах ТДГЗ (Т-1, глибини $5238,0\text{--}5412,0 \text{ м}$; Фм-1, глибини $5269,0\text{--}5486,0 \text{ м}$).

Можемо стверджувати, що геологічна обстановка глибоких горизонтів Валюхівського НГК родовища сприяє не лише вертикальній міграції ВВ у межах ТДГЗ, а й накопиченню їх у промислових масштабах.

Дискусія і висновки

У пропонованій роботі авторами були висвітлені особливості гідрогеологічних і термобаричних умов Валюхівського НГКР. На підставі проведеного аналізу

з'ясовано, що катагенетичний флюїдоупор у розрізі родовища залягає в інтервалі глибин 4,6–5,0 км.

Було встановлено також неоднорідність нижнього гідрогеологічного поверху. Виділено дві гідрогеологічні зони: верхня – елізійна – розповсюджена в частині розрізу над КФУ, нижня – термогидратативна – набуває розвитку в частині розрізу під КФУ.

Звертає на себе увагу той факт, що продуктивні горизонти родовища відомі як у межах ЕГЗ, так і в межах ТДГЗ. Це, на наш погляд, є дуже важливим, тому що нині у ДДЗ для пошуків вуглеводневих скупчень дедалі більше уваги приділяють глибокозатуреним горизонтам (Бенько та ін., 2013; Лукін, 2008; Кабишев та ін., 2011), пов'язаним із ТДГЗ. Як наслідок, це призводить до виникнення завдань із прогнозування АВПТ. Наприклад, у межах північної прибортової зони, на Коломацькому газоконденсатному родовищі, на глибинах понад 5,0 км залягають верхньосерпиховські горизонти з АВПТ, а на глибинах понад 6,0 км – візейські горизонти, геобаричні умови яких поки ще зовсім не досліджені.

Майбутні наукові плани пов'язані з охопленням такими дослідженнями всієї території північного борту та північної прибортової зони ДДЗ.

Досвід вивчення глибокозатурених горизонтів у ДДЗ, які розташовані у термогидратативній гідрогеологічній зоні, показує, що залишкова осадова товща, виконуючи газогенерувальну роль, часто постає величезною зоною субвертикального транзиту вуглеводнів, серед яких переважає, безсумнівно, метан.

Отже, у зоні пізнього катагенезу часто зустрічаються локальні, обмежені за розмірами зони розушільнення, ускладнені АВПТ, високими температурами, які практично не мають промислового значення. Розробка або навіть просто розкриття таких покладів може супроводжуватися швидким зниженням пластових тисків.

Підсумовуючи, наголосимо, що нинішні потреби нафтогазової геології і гідрогеології вимагають разом з розв'язанням теоретичних питань (генезису АВПТ тощо) швидких рішень конкретних практичних завдань, пов'язаних із пошуково-розвідувальним бурінням і розкриттям ТДГЗ.

Внесок авторів: Олександр Німець – формальний аналіз, написання (оригінальна чернетка); Дмитро Німець – написання (оригінальна чернетка), методологія; Дмитро Чомко – валідація даних, написання (перегляд і редагування); Ігор Удалов – концептуалізація, валідація даних.

Список використаних джерел

- Бенько, В. М., Маєвський, Б. Й., Лагутін, А. А., & Хомин, В. Р. (2013). *Особливості геологічної будови і перспективи нафтогазоносності глибокозатурених горизонтів Дніпровсько-Донецької западини*. ІФТУНГ.
- Заріцький, О. П., & Зінченко І. І. (1991). Взаємозв'язок гідрогеологічної зональності з газоносністю Дніпровсько-Донецької западини. У *Нові матеріали по водонапірних системах надвеликих газових та газоконденсатних родовищ* (с. 69–80). ВНИІГаз.
- Кабишев, Ю., Вакарчук, С., Стрижак, В., Довжок, Т., Зейкан, А., Гладун, В., & Чепіль, П. (2011). Сучасний стан досліджень газу центральнобасейнового типу у Дніпровсько-Донецькій западині. *Геолог України*, 2, 120–125.
- Капченко, Л. Н. (1983). *Гідрогеологічні основи теорії нафтогазонакоплення*. Надра.
- Карцев, О. О. (1963). *Гідрогеологія нафтових і газових родовищ*. Держоптдрок.
- Карцев, О. О. (1980). Гідрогеологічні умови проявлення надгідростатичних тисків у нафтогазоносних районах. *Геологія нафти і газу*, 4, 40–43.
- Колодій, В. В., & Нудик, Б. І. (1980). Гідрогеохімічні і геотермобаричні умови у глибоко затурених горизонтах карбону південно-східної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Геологія нафти і газу*, 8, 41–48.
- Колодій, В. В., Колодій, І. В., & Маєвський, Б. Й. (2009). *Нафтогазова відрогеологія*. Факел.
- Лукін, О. Ю. (2008). Девонські рифогенно-карбонатні комплекси Дніпровсько-Донецької западини і перспектива їх нафтогазоносності. *Геологічний журнал*, 3, 7–27.
- Німець, Д. К. (2008). Гідродинамічна і гідрогазохімічна зональність південної прибортової зони і прилягаючої до неї монокліналі. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Рациональне природокористування"*, 804, 128–138.

Німець, Д. К. (2011). Гідрохімічні умови південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Рациональне природокористування"*, 986, 51–56.

Німець, Д. К. (2014). Гідрогеологічні умови центральної частини південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини у зв'язку з нафтогазоносністю [Автореферат дис. канд. геол. наук, Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна]. ENPUIR. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r_81/PA406264

Німець, О. Д. (2013). Гідрогеологічні умови південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Тези науково-дослідницьких робіт учнів-членів Харківського територіального відділення Малої академії наук України* (с. 230–231). Харків.

Німець, О. Д. (2014). Термобаричні умови південної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Тези науково-дослідницьких робіт учнів-членів Харківського територіального відділення Малої академії наук України* (с. 181–182). Харків.

Новосілецький, Р. М. (1969). *Пластові тиски флюїдів у надрах України*. Техніка.

Орлов, О. О., Євдошук, М. І., Омельченко, В. Г., & Трубенко, О. М. (2007а). Концепція геодинамічного походження аномальних пластових тисків в осадовій оболонці Земної кори. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 3(1), 18–22.

Орлов, О. О., Євдошук, М. І., Омельченко, В. Г., & Трубенко, О. М. (2007б). Концепція геодинамічного походження аномальних пластових тисків в осадовій оболонці земної кори. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 4(2), 30–40.

Орлов, О. О. (1980). *Аномальні пластові тиски у нафтогазоносних об'єктах України*. Видавництво Львівського університету.

Осадчий, В. Г., Лур'є, А. І., Єрофієв, В. Ф. (1976). *Геотермічні критерії нафтогазоносності*. Наукова думка.

Петін, А. М., Німець, К. А., Німець, Д. К., & Німець, О. Д. (2013). До методики прогнозування скупчень вуглеводнів по результатах геотермічних і гідрогеологічних досліджень. *Сучасні проблеми науки та освіти*, 6, 6–11.

Решетов, І. К., Чомко, Ф. В., & Чомко, Д. Ф. (2004). Супутньо-промислові води нафтових родовищ – джерело забруднення бучацько-канівського горизонту. *Вісник Українського будинку економічних та науково-технічних знань*, 53–57.

Терещенко, В. О. (1987). Гідродинамічна структура нижнього гідрогеологічного поверху Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну. *Вісник Харківського університету. Серія "Рациональне природокористування"*, 306, 48–50.

Терещенко, В. О. (2001). Гідродинамічна модель Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну. *Вісник Харківського університету. Серія "Рациональне природокористування"*, 521, 102–105.

Удалов, І. В. (2016). Трансформація геологічного середовища під впливом техногенних процесів в умовах Північно-Східного Донбасу. ХНУ ім. В. Н. Каразіна.

Чомко, Д. Ф., & Рева, М. В. (2017). Супутньо-пластова вода, як важлива економічна складова функціонування нафтовидобувних підприємств України. *Вісник Київського університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77, 93–98.

Aplin, A. C., & Larter, S. R. (2005). Fluid flow, pore pressure, wettability, and leakage in mudstone cap rocks. *Evaluating fault and cap rock seals*, 1–12. American Association of Petroleum Geologists.

Ferran, L. M. (1973). *Evolution of abnormally high and low pressured Morrow sands in north-western Oklahoma using well logs and water simple data*. Univ. of Tulsa.

Hanson, P., Trigg, T., Rachal, G., & Zamora, M. (1990). Investigation of Barite Sag in Weighted Drilling Fluids in High Deviated Wells. *SPE paper 20423 presented at the SPE Annual Conference and Exhibition. New Orleans*, 23–26.

Hast, N., & Nilson, T. (1958). Resept rock pressure in mines. *Sver. Geol. undersökn. ser. Arsbok*, Stookholm, 52, 3.

Levoniuks, S. M., Samoilov, V. V., Udalov, I. V., & Petik, V. O. (2019). Ecological and hydrogeological factors of qualitative composition destabilization of drinking groundwater within the central part of DDAB. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Геологія. Географія. Екологія"*, 51, 207–220.

Song, Ge. (2015). *Coupling model of transient temperature and pressure in gas wells*. Chengdu

Trick, M. D. (2003). Comparison of Correlations For Predicting Wellbore Pressure Losses in Gas-Condensate and Gas-Water Wells. *1 Canadian international petroleum conference*, 3–19

Wu, Y., & Bai, B. (2009). Efecient Simulation for Low-Salinity Water-Eooding in Porous and Fractured Reservoirs. *SPE 118830-SPE Reservoir Si mulation Symposium held in The Woodlands, Texas, USA*.

References

- Aplin, A. C., & Larter, S. R. (2005). Fluid flow, pore pressure, wettability, and leakage in mudstone cap rocks. *Evaluating fault and cap rock seals*, 1–12. American Association of Petroleum Geologists. Oklahoma.
- Benko, V. M., Mayevsky, B. J., Lagutin, A. A., & Khomyn, V. R. (2013). *Features of the geological structure and prospects of oil and gas content of the deeply zoned horizons of the Dnipro-Donetsk Depression*. IFNTUOG [in Ukrainian].
- Chomko, D. F., & Reva, M. V. (2017). Associated reservoir water as an important economic component of the functioning of oil producing enterprises

in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 93–98 [in Ukrainian].

Ferran, L. M. (1973). *Evolution of abnormally high and low pressured Morrow sands in north-western Oklahoma using well logs and water simple data*. Univ. of Tulsa.

Hanson, P., Trigg, T., Rachal, G., & Zamora, M. (1990). Investigation of Barite Sag in Weighted Drilling Fluids in Higlu Deviated Wells. *SPE paper 20423 presented at the SPE Annual Conference and Exhibition. New Orleans*, 23–26.

Hast, N., & Nilson, T. (1958). Resept rock pressure in mines. *Sver. Geol. undersökn, ser. Arsbok*, Stookholm, 52, 3.

Kabyshev, Y., Vakarchuk, S., Strizhak, V., Dovzhok, T., Zeikan, A., Gladun, V., & Chepil, P. (2011). Current state of research on central basin type gas in the Dnipro-Donetsk depression. *Ukrainian Geologist*, 2, 120–125 [in Ukrainian].

Kapchenko, L. N. (1983). *Hydrogeological bases of the theory of oil and gas accumulation*. Nadra [in Ukrainian].

Kartsev, O. O. (1963). *Hydrogeology of oil and gas fields*. Derzhoptdruk [in Ukrainian].

Kartsev, O. O. (1980). Hydrogeological conditions of manifestation of superhydrostatic pressures in oil and gas bearing areas. *Geology of Oil and Gas*, 4, 40–43 [in Ukrainian].

Kolodii, V. V., & Nudik, B. I. (1980). Hydrogeochemical and geothermobaric conditions in deeply submerged Carboniferous horizons of the southeastern part of the Dnipro-Donetsk depression. *Geology of Oil and Gas*, 8, 41–48 [in Ukrainian].

Kolodiy, V. V., Kolodiy, I. V., & Mayevskiy, B. J. (2009). *Oil and gas hydrogeology*. Fakel [in Ukrainian].

Levoniuk, S. M., Samoilov, V. V., Udalov, I. V., & Petik, V. O. (2019). Ecological and hydrogeological factors of qualitative composition destabilization of drinking groundwater within the central part of DDAB. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 51, 207–220.

Lukin, O. Y. (2008). Devonian rifogenic-carbonate complexes of the Dnipro-Donetsk Basin and the prospect of their oil and gas content. *Geological Journal*, 3, 7–27 [in Ukrainian].

Nimets, D. K. (2008). Hydrodynamic and hydrogas-chemical zonation of the southern nearshore zone and the adjacent monocline. *V. N. Karazin Kharkiv National University Bulletin. Series "Rational Nature Management"*, 804, 128–138 [in Ukrainian].

Nimets, D. K. (2011). Hydrochemical conditions of the southern coastal zone of the Dnipro-Donetsk depression. *V. N. Karazin Kharkiv National University Bulletin. Series "Rational Nature Management"*, 986, 51–56 [in Ukrainian].

Nimets, D. K. (2014). Hydrogeological conditions of the central part of the southern coastal zone of the Dnipro-Donetsk depression in connection with oil and gas bearing capacity [Thesis for the degree of Candidate of Geological Sciences, V. N. Karazin Kharkiv National University]. ENPUIR [in Ukrainian]. https://irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis64r_81/PA406264

Nimets, O. D. (2013). Hydrogeological conditions of the southern coastal zone of the Dnipro-Donetsk depression. *Theses of research works of students-members of the Kharkiv territorial branch of the Minor Academy of Sciences of Ukraine* (p. 230–231). Kharkiv [in Ukrainian].

Nimets, O. D. (2014). Thermobaric conditions of the southern coastal zone of the Dnipro-Donetsk depression. *Theses of research works of students-members of the Kharkiv territorial branch of the Minor Academy of Sciences of Ukraine* (p. 181–182). Kharkiv [in Ukrainian].

Novosiletsky, R. M. (1969). *Reservoir fluid pressures in the subsoil of Ukraine*. Technics [in Ukrainian].

Orlov, O. O. (1980). *Anomalous reservoir pressures in oil and gas bearing objects of Ukraine*. Lviv University Press [in Ukrainian].

Orlov, O. O., Evdoshchuk, M. I., Omelchenko, V. G., & Trubenko, O. M. (2007a). The concept of geodynamic origin of anomalous reservoir pressures in the Earth's crustal shell. *Exploration and Development of Oil and Gas Fields*, 3(1), 18–22 [in Ukrainian].

Orlov, O. O., Evdoshchuk, M. I., Omelchenko, V. G., & Trubenko, O. M. (2007b). The concept of geodynamic origin of anomalous reservoir pressures in the crustal shell. *Exploration and Development of Oil and Gas Fields*, 4(2), 30–40 [in Ukrainian].

Osadchii, V. G., Lurie, A. I., & Erofiyev, V. F. (1976). *Geothermal criteria of oil and gas bearing capacity*. Scientific thought [in Ukrainian].

Petin, A. M., Nemets, K. A., Nemets, D. K., & Nemets, O. D. (2013). To the methodology of hydrocarbon accumulation forecasting based on the results of geothermal and hydro-geological studies. *Modern problems of science and education*, 6, 6–11 [in Ukrainian].

Reshetov, I. K., Chomko, F. V., & Chomko, D. F. (2004). Associated industrial waters of oil fields – a source of pollution of the Buchach-Kaniv horizon. *Bulletin of the Ukrainian House of Economic and Scientific and Technical Knowledge*, 53–57 [in Ukrainian].

Song, Ge. (2015). *Coupling model of transient temperature and pressure in gas wells*. Chengdu

Tereshchenko, V. O. (1987). Hydrodynamic structure of the lower hydrogeological floor of the Dnipro-Donetsk artesian basin. *Bulletin of Kharkiv University. Series "Rational Nature Management"*, 306, 48–50 [in Ukrainian].

Tereshchenko, V. O. (2001). Hydrodynamic model of the Dnipro-Donetsk artesian basin. *Bulletin of Kharkiv University. Series "Rational Nature Management"*, 521, 102–105 [in Ukrainian].

Trick, M. D. (2003). Comparison of Correlations For Predicting Wellbore Pressure Losses in Gas-Condensate and Gas-Water Wells. *1 Canadian international petroleum conference*, 3–19

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].

Wu, Y., & Bai, B. (2009). Eficient Simulation for Low-Salinity Water-Eoo ding in Porous and Fractured Reservoirs. *SPE 118830-SPE Reservoir Si mulation Symposium held in The Woodlands, Texas, USA*.

Zaritsky, O. P., & Zinenko, I. I. (1991). Interrelation of hydrogeological zonation with gas content of the Dnipro-Donetsk depression. In *New materials on water pressure systems of super large gas and gas condensate fields* (p. 69–80). VNIIGaz [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 16.02.24

Прорецензовано / Revised: 28.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Olexandr NIMETS¹, Researcher,
e-mail: muhtarok14@gmail.com

Dmytro NIMETS¹, PhD (Geol.), Leading Researcher
e-mail: dmitrynemets@gmail.com

Dmytro CHOMKO², PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-8454-5531
e-mail: Chomko@knu.ua

Igor UDALOV³, DSc (Geol.), Prof.
ORCID ID: 0000-0003-3844-6481
e-mail: igorudalov8@gmail.com

¹Ukrainian Research Institute of Natural Gases, Kharkiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

FEATURES OF HYDROGEOLOGICAL AND THERMOBARIC CONDITIONS OF THE VLACHIVSKE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD

Background. Today, the practical tasks of oil and gas geology include prospecting and exploration, subsoil development, development of oil and gas fields and many others related to a wide range of related sciences, such as anthropogenic impact on the geological environment, environmental and hydrogeological issues of the impact of oil and gas fields on drinking water, etc. This paper deals with the hydrogeological and thermobaric conditions of the Valyukhivske oil and gas condensate field (OGCF), which is located in the junction zone of the northern coastal zone and the central axial zone of the Dnipro-Donetsk Basin (DDB).

Methods. The proposed methodological approach is based on the theoretical notion that regional geothermal anomalies can be formed only by hydrocarbon (methane) gases due to their vertical migration. Therefore, the priority is to search for areas within oil and gas basins that are characterised by elevated geothermal field values as a result of certain factors (neotectonic movements, etc.). At the next stage, the hydrogeological conditions of the section are determined, and their relationship with the oil and gas content of the region is investigated. Subsequently, the gas-geochemical conditions of the section are determined, and the relationship of the component composition of free gases with depth and current reservoir temperatures is established.

Results. *The Valikhivske OGCF is interesting in hydrogeological terms because in its section within the lower hydrogeological floor a thermo-dehydration hydrogeological zone and related phenomena, such as abnormally high reservoir pressures, are developing. In addition, the thermo-dehydration zone here is not only a huge area of hydrocarbon migration, but also contains their commercial accumulations in the sediments of the Tournai and Famienian stages.*

Conclusions. *Based on the analysis, it was found that the catagenetic fluidic stop (CFS) in the field section lies in the depth range of 4.6–5.0 km and has heterogeneity of the lower hydrogeological floor, two hydrogeological zones were identified. The upper one is elision zone, which is widespread in the section above the CFC, and the lower one is thermo-dehydration zone, which becomes extensive in the section below the CFC. The productive horizons of the Valyukhivske OGCF are known both within the EGD and TDGD.*

Taking into account the data obtained, we can state that the geological setting of the deep horizons of the Valyukhivske OGCF field contributes not only to the vertical migration of HC within the TDGF, but also to their accumulation on an industrial scale.

Keywords: *Valyukhiv oil and gas condensate deposit, Dnipro-Donetsk basin, hydrogeodynamic systems, Elysian hydrogeological zone, thermodehydration hydrogeological zone, abnormally high reservoir pressures, catagenetic fluid resistance.*

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 550.3 (519.21)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.12>

Zoya VYZHVA, DSc (Phys. & Math.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-6338-3892

e-mail: zoya_vyzhva@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Vsevolod DEMIDOV, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0009-0003-9472-6530

e-mail: demidov@knu.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Andrii VYZHVA, PhD (Phys. & Math.), Chief Specialist

ORCID ID: 0009-0003-6699-5848

e-mail: andrii.vyzhva@ugv.com.ua

UkrNDIgaz Research Institute, Kyiv, Ukraine

THE STATISTICAL SIMULATION OF DATASET IN 3D AREA WITH "CUBIC" CORRELATION FUNCTION ON EXAMPLE RIVNE NPP GEOPHYSICAL MONITORING

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. Б. П. Масловим)

Background. The model and algorithm were developed by using optimal in the mean square sense "cubic" correlation function. An example of supplementing the results of geophysical studies of karst-suffuses phenomena with simulated data in the task of monitoring the density of the chalk stratum on the territory of the Rivne NPP is presented.

The complex geophysical research was conducted on Rivne NPP area. The monitoring observations radioisotope study of soil density and humidity near the perimeter of buildings is of the greatest interest among these. In this case a problem was occurred to supplement simulated data that were received at the control of chalky strata density changes at the research industrial area with use of radioisotope methods on a grid that included 29 wells.

This problem was solved in this work by statistical simulation method that provides the ability to display values (the random field of a research object in 3D area) in any point of the monitoring area.

Methods. Based on the spectral decomposition of random fields in 3D space, a statistical model of the distribution of the average density of the chalk layer in the 3D observation area was built.

Results. An algorithm for statistical simulation of random fields with a "cubic" correlation function is formulated. On the basis of the developed software, additional simulated realizations of the random component of the research subject on the grid of observations of the necessary detail and regularity were obtained. A statistical analysis of the results of the numerical simulation of the distribution of the average density of the chalk layer was carried out and their adequacy was tested.

Conclusions. The method of statistical modeling of random fields with "cubic" correlation functions allows you to supplement data with a given accuracy.

Keywords: Statistical simulation, "cubic" correlation function, spectral decomposition, conditional maps.

Background

Due to the increasing number of dangerous natural and technogenic disasters in the world, the development of geological environment monitoring system is actual using modern mathematical tools and information technology. The regular local monitoring of potentially dangerous objects of human activity is an important part of the overall environment monitoring system. When monitoring such objects, many actual problems were raised, for example, such as the lack of some data in the database, or insufficient quantity or necessity to supplement the database on the grid with required detail without conducting additional research.

Theoretical aspects of capacity use of the statistical simulation methods based on spectral decomposition to solving different apply problems considered in the works (Yadrenko, 1983; Guyon, 1993; Chiles, & Delfiner, 2012; Vyzhva, 2003, 2011, 2021). Practical testing on real density chalky strata data on the Rivne NPP territory was carried out for the 3D area – in the following works by using Bessel correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013), Cauchy correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2014b) and spherical correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2020b).

In this paper, the statistical simulation method for random field in 3D area we propose to use with the model and procedure involving enough adequate in the mean square sense data "cubic" correlation function. It is known

(Chiles et al., 2005), that the "cubic" covariance model is used for differentiable variables as well as potential fields in geological modelling. The potential-field method was designed by (Chiles et al., 2005) to build 3D geological models from data available in geology and mineral exploration, namely the geological map, structural data, borehole data and interpretations of the geologist, because most 3D geological known modelling tools were designed for the needs of the oil industry and are not suited to the variety of situations arisen in other application domains of geology. This problem was considered also in paper (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2020a).

Note, that methods of 3D random fields statistical simulation used in geosciences problems was developed by the scientists: Mantoglov, & Wilson, 1981; Wackernagel, 2003; Emery, & Lantuejoul, 2006; Webster, & Oliver, 2007; Chiles, & Delfiner, 2012; Tolosana-Delgado, & Mueller, 2021 and other.

The essential problems of karst-suffusion phenomena monitoring at Rivne NPP territory. The problems of the random field simulation in 3D area arise in solving the actual environmental geophysical monitoring problems. The complex geophysical research was conducted on Rivne NPP territory during many years. The radioisotope study of soil density and humidity near the perimeter of constructed buildings on object is of the greatest interest among these monitoring observations. The soil density was determined by gamma-gamma well

logging, soil humidity was determined by neutron-neutron logging, when conducting this research.

In this case (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013) a problem occurred to supplement adequately simulated adequate data that were received at the control of chalky strata density changes at the research industrial area with use of radioisotope methods on a grid that included 29 wells.

Schematic representation of the measurement results chalky strata density at the Rivne NPP object that was investigated, and the well locations are shown on Fig. 1. These data are obviously not enough in detail to represent the overall picture of the chalk strata on object, where due to the aggressive water action the karst-suffusion processes were significantly intensified.

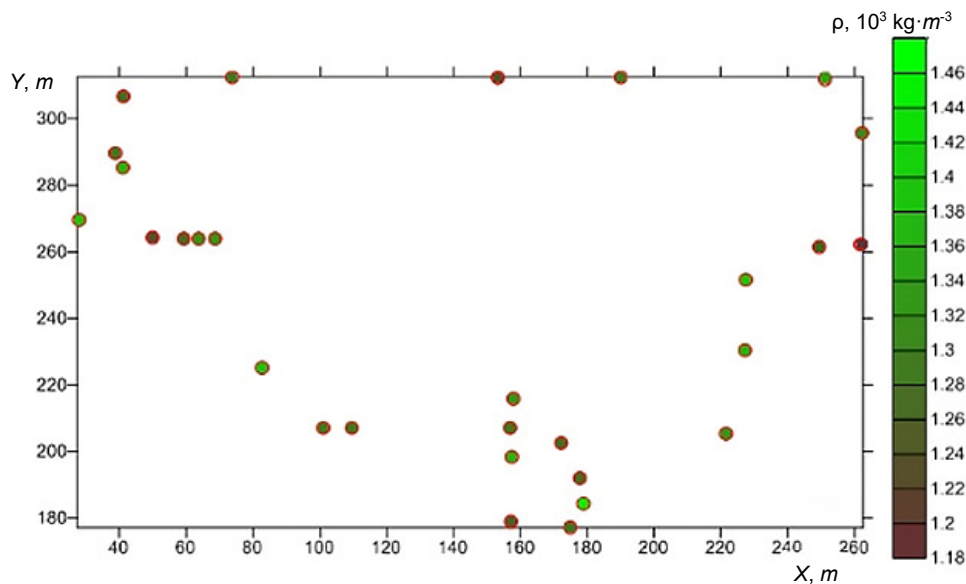


Fig. 1. Observation points and chalk strata averaged density at industrial area of Rivne NPP

This noted problem was solved in following works: (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013, 2014a, 2014b, 2019, 2020b) by statistical simulation method that provides the ability to display values (random field in three-dimensional space) in any point of the monitoring area. The chalk strata averaged density at the industrial area was simulated using the built 3D model and the involvement of the Bessel type correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013), Cauchy correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2014b) and spherical correlation function (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2020b).

This paper continues further development of 3D statistical simulation methods, involving "cubic" correlation function that is well-known in geostatistic works (Chiles et al., 2005; Chiles, Delfiner, 2012; Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2020a). This operation was done for data array of density chalk strata in the years 1984–2002 for 29 wells at Rivne NPP industrial area and depths are 28 m, 29 m and 30 m below the surface. The difference between the card input density values and the trend is in most cases a homogeneous isotropic random field (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2014b, 2019). The stationary random component in the three-dimensional area is proposed to modeling on the basis of spectral decomposition (Vyzhva, 2003, 2011) with "cubic" correlation function in this paper.

The statistical method of solving the problems at Rivne NPP territory. The statistical simulation of density chalky strata data at the Rivne NPP object was performed at three levels (28, 29, 30 meters from the surface) in this paper. While constructing graphs of density chalky strata data for each specified account, we noticed that it is expedient to distinguish deterministic and random components. Deterministic component can be selected as function by the method of approaching the minimum curve (separation of the so-called trend). The difference between

the map of input density values and the trend is a realization of homogeneous isotropic random field in the most cases, as we mentioned above and which is very important.

Input data on the each of three level from the surface is a realization of random field in 3D space $\eta(x, y, z_i)$, $i = 1, 2, 3$; $z_1 = 28m$, $z_2 = 29m$, $z_3 = 30m$. $\eta(x, y, z_i) = \eta_i(r, \theta, \varphi)$, (r, θ, φ) – spherical coordinates, i – level numbers. The trend $f_i(r, \theta, \varphi)$ and the random component $\xi_i(r, \theta, \varphi)$ (frequently homogeneous isotropic random field in 3D space, so-called "noise") were selected for each level:

$$\eta_i(r, \theta, \varphi) = f_i(r, \theta, \varphi) + \xi_i(r, \theta, \varphi), \quad i = 1, 2, 3.$$

The imposing array of random field realizations $\xi_i(r, \theta, \varphi)$ ($i = 1, 2, 3$) was got by statistical simulation in add points from three-dimensional observations area for the approximation of real data, we superimpose on the trend $f_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 1, 2, 3$. As a result of final modelling stage, we received more detailed addition for the chalk layer density data in the selected three-dimensional area at Rivne NPP.

We use the method of statistical simulation of homogenous isotropic random fields in 3D area for the solving arising problem, which is based on their spectral decomposition (Vyzhva, 2003). This technique allows to find the sufficiently perfect image of input data random fields in the whole observation area at the Rivne NPP by means of simulated realizations of random component of this data.

At first it is necessary to make the statistical analysis of data before building the model and procedure of chalky strata density simulation at observation 3D area. If the three-dimensional input data has distribution density with approximately Gaussian type, then procedure can be used, which is developed in (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2013; Vyzhva, 2011), to generate on the computer realizations of the simulated data by means of sequences standard normal random variables.

The distribution of **chalky** strata density data at the **Rivne NPP** is determined. The preliminary statistical analysis of 3D input data shows that the distribution histogram of chalky strata density at the Rivne industrial area (29 boreholes) approximately has Gaussian distribution (Fig. 2).

The use of authors' techniques of statistical simulation involves preliminary statistical processing of data to determine their statistical characteristics, in particular, the correlation function model. If the hypothesis of Gaussian

distribution of the investigated data field is confirmed, then the mathematical expectation and the correlation function completely define this random field in three-dimensional area and give us the opportunity to build the adequate statistical model for data field, which is based on the spectral decomposition. The principles of constructing the models and statistical simulation procedures for the "cubic" correlation function were considered in work (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2020a), and described below.

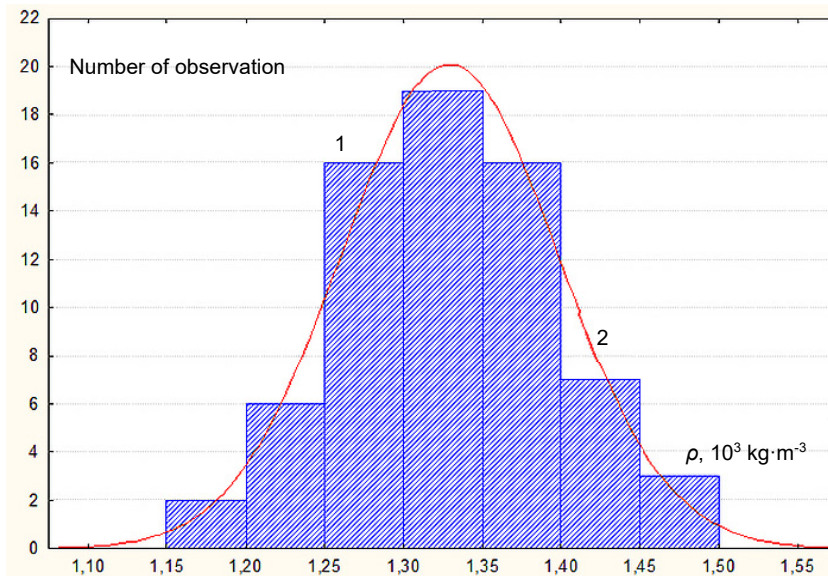


Fig. 2. Histogram of the chalky strata density (averaged data for all years of observation):
1 – the number of observations in a separate range of density; 2 – theoretical Gaussian curve

Then for the data correlation function $B(\rho)$ (ρ – the distance between vectors $x, y \in R^3$ ($x = (r_1, \theta_1, \varphi_1)$, $y = (r_2, \theta_2, \varphi_2)$)) statistical models were chosen for the distribution of the density of chalk strata in the three-dimensional observation area. This function is determined by comparing the root-mean-square approximation of empirical and theoretical variograms of the density data of chalk layers.

As a result, the input data was most adequately described using of 3 types of correlation functions: the Bessel correlation function (1) at the value of parameter $c = 5$, the Cauchy correlation function (2) at the value of parameter $a = 1$, the spherical correlation function (3) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$ and the "cubic" correlation function (4) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$.

$$B(\rho) = \sqrt{\frac{\pi}{2cr}} J_{\frac{1}{2}}(c\rho), \quad c = 5, \quad (1)$$

where $J_k(x)$ is the Bessel function of the first kind of order $k = 1/2$,

$$B(\rho) = \frac{a^4}{(a^2 + \rho^2)^2}, \quad a = 1, \quad (2)$$

$$B(\rho) = \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} \frac{\rho}{a} + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{a}\right)^3, & \rho \leq a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \quad (3)$$

$$B(\rho) = \begin{cases} 1 - 7 \left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \frac{35}{4} \left(\frac{\rho}{a}\right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{\rho}{a}\right)^5 + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{a}\right)^7, & \rho \leq a; \\ 0, & \rho > a. \end{cases} \quad (4)$$

It is known, that homogenous isotropic random field has a variogram $\gamma(\rho)$. In that case the variogram (Chiles et al., 2005) is linked to the correlation function $B(\rho)$ by the relation

$$\gamma(\rho) = B(0) - B(\rho). \quad (5)$$

Thus, the variogram of a homogenous isotropic random field is bounded by $2 B(0)$. Equation (5) shows that if the correlation function is known, the variogram is also known. Conversely, if the variogram of a homogenous isotropic random field is bounded by a finite value, $\gamma(\rho)$ is of the form (5). If the variogram has a sill, the value of $B(0)$ must be chosen equal to or greater than the sill. It is then equivalent to know $\gamma(\rho)$ or $B(\rho)$.

Variograms of input chalky strata density 3D data at the Rivne NPP was built by using the *R* software and *geoR* package. They correspond to the: Bessel (1) correlation function (the mean square approximation is 0,0008599), Cauchy (2) correlation function (the mean square approximation is 0,002816), spherical (3) correlation function (the mean square approximation is 0,000480) and "cubic" correlation function (4) (the mean square approximation is 0,001360). Variograms plots were presented at Fig. 3a, according to Bessel type of correlation function, at Fig. 3b, according to Cauchy type of correlation function, at Fig. 3c, according to spherical type of correlation function for the random component of investigation three-dimensional data.

The built empirical variogram (Fig. 4) of input chalky strata density 3D data at the Rivne NPP has the best approximation by theoretical variogram which is connected to the "cubic" correlation function (4) with parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$.

We have, that the constructed variogram of realizations in the studied territory (Fig. 5) has sufficiently adequate approximation by the theoretical variogram, which is associated with a "cubic" correlation function (a mean square deviation is $1,36 \cdot 10^{-3}$).

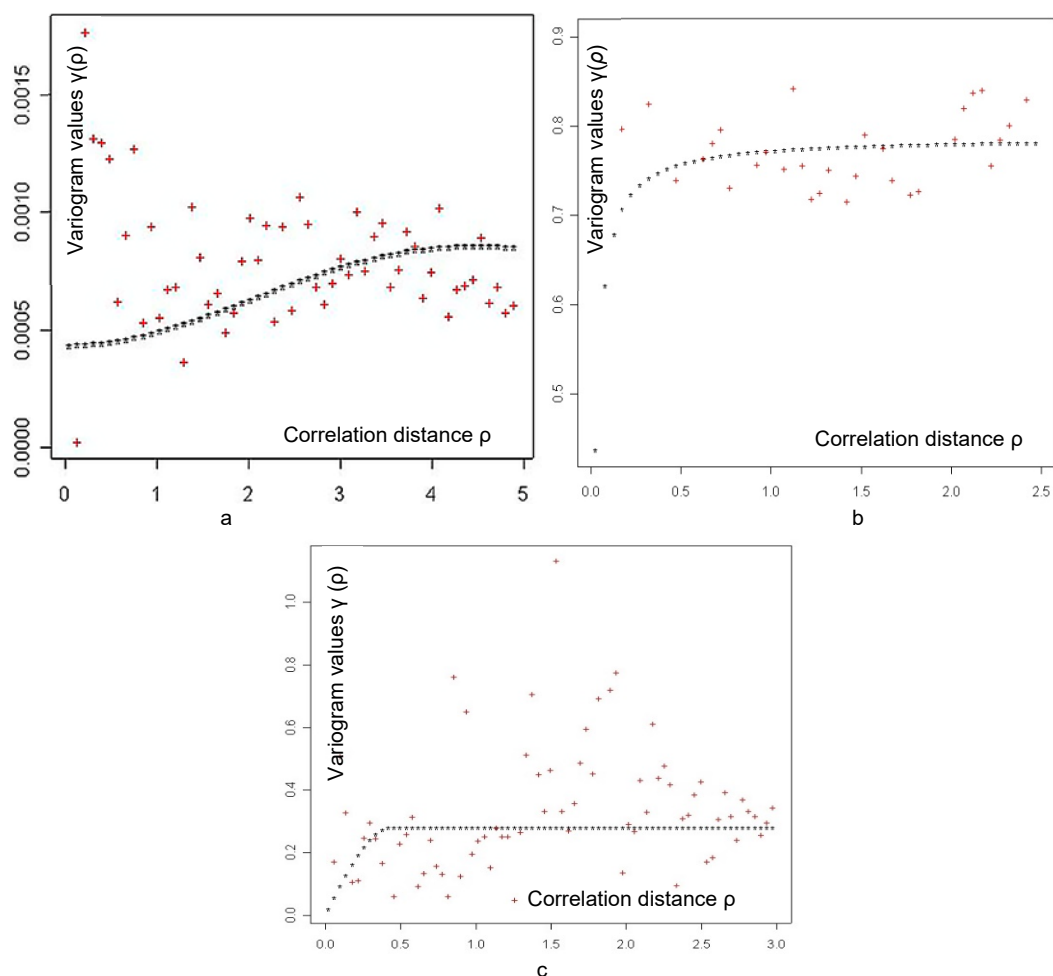


Fig. 3. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms for input data of the chalky strata, that corresponding to the: a – the Bessel (1) correlation function; b – the Cauchy (2) correlation function; c – the Spherical (3) correlation function

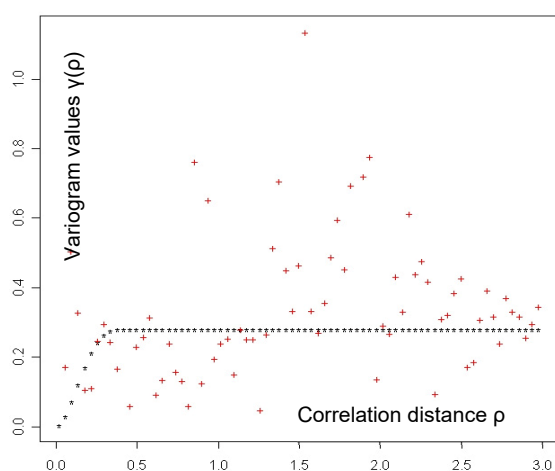


Fig. 4. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms of input data arrays of chalk layer density, corresponding to "cubic" correlation function ($a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$)

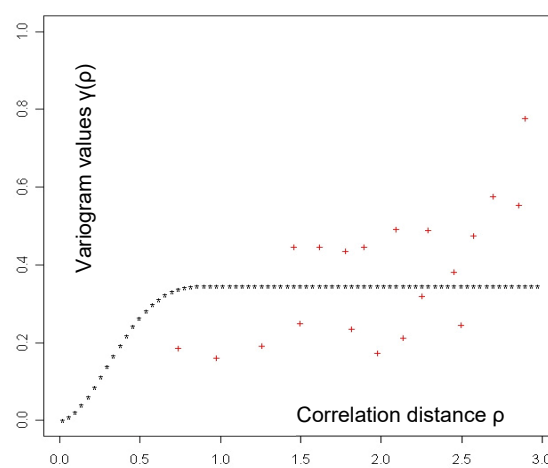


Fig. 5. Empirical (crosses) and theoretical (curve) variograms of simulated data arrays of chalk layer density, corresponding to "cubic" correlation ($a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$)

Methods

The spectral representation of homogeneous isotropic random fields in the 3D area, approximation theorem, model. Now we present some theorems from the spectral theory of random fields. We consider a real-valued homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ in the three-

dimensional area ($\xi(r, \theta, \varphi)$ – spherical coordinates). It is known (Yadrenko, 1983; Vyzhva, 2003; Vyzhva, 2011, p. 208) that square-mean continuous real-valued isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$, that is in 3D Euclidean space R^3 , admit the spectral decomposition by spherical harmonics.

The correlation function of the homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ in three-dimensional area $B(\rho)$ depends on distance ρ between the vectors $x, y \in R^3$ ($x = (r_1, \theta_1, \varphi_1)$, $y = (r_2, \theta_2, \varphi_2)$):

$$\rho = r\sqrt{2(1 - \cos\psi)} = r\sin(\psi/2),$$

where $\cos\psi$ – angular distance between vectors $x, y \in R^3$:

$$\cos\psi = \cos\theta_1\cos\theta_2 + \sin\theta_1\sin\theta_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

However, the spectral decomposition of this random field is used to solve the problems of statistical modeling of

$$\xi(r, \theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^m \tilde{c}_{m,l} P_m^l(\cos\theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi], \quad (6)$$

where P_m^l is associated Legendre functions of degree m , $\tilde{c}_{m,l}$ – constants sequences are calculated by the formula:

$$\tilde{c}_{m,l} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu_l (m-l)!}{\pi (m+l)!}} (2m+1), \quad \nu_l = \begin{cases} 1, & l \neq 0, \\ 2, & l = 0; \end{cases} \quad (7)$$

random processes sequences $\{\zeta_{m,k}^l(r)\}$, $k = 1, 2$:

$$\zeta_{m,k}^l(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)}{(\lambda r)^{\frac{1}{2}}} Z_{m,k}^l(d\lambda), \quad \text{satisfying the following conditions:}$$

$$1) M \zeta_{m,k}^l(r) = 0;$$

$$2) M \zeta_{m,k}^l(r) \zeta_{m',k'}^{l'}(r) = \delta_l^l \delta_m^m \delta_k^k b_m(r), \quad (8)$$

where δ_m^m – Kronecker symbol, $b_m(r)$ – the spectral coefficients and $\{Z_m^l(\cdot)\}$ is a sequence of orthogonal random measures on Borel subsets from the interval $[0, +\infty)$, i.e.

$$E Z_m^l(S_1) Z_{m'}^{l'}(S_2) = \delta_l^l \delta_m^m \Phi(S_1 \cap S_2),$$

for any Borel subsets S_1 and S_2 ,

$$\xi_N(r, \theta, \varphi) = \sum_{m=0}^N \sum_{l=0}^m c_{m,l} P_m^l(\cos\theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi], \quad N \in \mathbb{N}. \quad (11)$$

We need the mean square approximation of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by model (11) in the convenient form for the constructing statistical simulation of homogeneous isotropic random field realizations in the 3D space algorithm.

Further we used mean square estimate from the paper (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2018), what we have in following theorem.

Theorem 2. Let a mean square continuous realvalued isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ on the sphere $S_3(r)$ in 3D space with zero mean (r – radius of sphere). If $\mu_3 < +\infty$, then the mean square approximation of this random field by model (9) is such that

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^a \rho \lambda \sin(\lambda \rho) \left(1 - 7 \left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \frac{35}{4} \left(\frac{\rho}{a}\right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{\rho}{a}\right)^5 + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{a}\right)^7\right) d\rho. \quad (14)$$

The spectral coefficients, which correspond to the "cubic" correlation function (4) of homogeneous isotropic

$$b_m(r) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}^2(\lambda r)}{\lambda^2 r} \left[\int_0^a \rho \lambda \sin(\lambda \rho) \left(1 - 7 \left(\frac{\rho}{a}\right)^2 + \frac{35}{4} \left(\frac{\rho}{a}\right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{\rho}{a}\right)^5 + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{a}\right)^7\right) d\rho \right] d\lambda. \quad (15)$$

These spectral coefficients $b_m(r)$, $m = 0, 1, 2, \dots, N$ are calculated by Mathematica software for density chalky strata data.

Results

The statistical simulation procedure of random field in 3D area with the "cubic" correlation function. In this paper we generated the realizations of homogeneous isotropic random field in 3D area with the "cubic" correlation

realizations of a random field in three-dimensional space, where real-valued random variables occur. Let's add this decomposition.

Theorem 1. Let a mean square continuous realvalued homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is in 3D space with zero mean. Then this random field admits (Vyzhva, 2011, p. 210) the following spectral decomposition:

where $\Phi(\lambda)$ is the bounded nondecreasing function so-called spectral function of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$.

The spectral density of homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is defined as $f(\lambda) = d\Phi(\lambda)/d\lambda$ and it is obtained by correlation function of this random field as integral:

$$f(\lambda) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \rho \lambda \sin(\lambda \rho) B(\rho) d\rho. \quad (9)$$

The spectral coefficients $b_m(r)$ of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ are defined by the spectral density $f(\lambda)$ of this random field in three-dimensional space in the way:

$$b_m(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}^2(\lambda r)}{\lambda r} f(\lambda) d\lambda. \quad (10)$$

Further the statistical simulation of homogeneous isotropic random fields in the 3D space on the basis the spectral decomposition (6) coefficients (10) are considered.

Approximation model for the homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is built by using the partial sums of series (6) and is presented by the formula:

$$M [\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)]^2 \leq \frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3, \quad (12)$$

$$\text{where } \mu_3 = \int_0^{\infty} \lambda^3 \Phi(d\lambda). \quad (13)$$

If we proposed, that r (radius of sphere) is not fixed, then the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ is in 3D Euclidean space R^3 .

Further, we described the algorithm for the statistical simulation of realizations of Gaussian homogeneous isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ in 3D Euclidean space R^3 , which was constructed on the basis of model (11) and estimate (12)

We constructed on this paper the algorithm for the statistical simulation of Gaussian homogeneous isotropic random fields on three-dimensional space space with "cubic" correlation function (4).

The spectral density is obtained for "cubic" correlation function (4) by means the formula (9) as:

random field $\xi(r, \theta, \varphi)$, are calculated by the formula (9) and we have:

function (4) at the values of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$. The statistical simulation of density chalky strata data at the Rivne NPP object was performed by the technique of spectral decomposition and finding of spectral coefficients.

The procedure of numerical simulation of the realizations of the 3D data field random component, by means of the above mentioned model (11), was conducted, which is described in (Vyzhva, Demidov, & Vyzhva, 2018).

The value of number N for the constructed model is determined by the inequality, which is the estimate of the mean square approximation of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by partial sums $\xi(r, \theta, \varphi)$. This number N corresponds to the prescribed small number ε (approximation accuracy). The mentioned inequality was obtained in theorem 2. Consequently, the estimate of the mean square approximation of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ with

$$\mu_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^K \lambda^3 \left[\int_0^a \rho \lambda \sin(\lambda \rho) \left(1 - 7 \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 + \frac{35}{4} \left(\frac{\rho}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{\rho}{a} \right)^5 + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{a} \right)^7 \right) d\rho \right] d\lambda, K = K(a) - \text{const.} \quad (16)$$

We define dependence number N on r and ε in the case of "cubic" correlation function (4) as a following:

$$N(r, \varepsilon) \geq \sqrt{\frac{5\pi r^3}{2\varepsilon}} \mu_3. \quad (17)$$

The statistical simulation procedure of Gaussian homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ in 3D area with "cubic" correlation function (4) was built by means of the model (9) and the estimate (15). This random field is determined by its statistical characteristics: the

$$\mu_3 = \frac{2}{\pi} \int_0^K \lambda^3 \left[\int_0^a \rho \lambda \sin(\lambda \rho) \left(1 - 7 \left(\frac{\rho}{a} \right)^2 + \frac{35}{4} \left(\frac{\rho}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left(\frac{\rho}{a} \right)^5 + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{a} \right)^7 \right) d\rho \right] d\lambda, K = K(a) - \text{const.}$$

Calculate the spectral coefficients $b_m(r)$, $m = 0, 1, 2, \dots, N$ for the "cubic" correlation function (4) as integral (15).

2. Simulate the sequences of independent Gaussian normal random variables:

$\{ \zeta_{m,k}^l(r) \}$, $k = 1, 2; m = 0, 1, 2, \dots, N; l = 1, \dots, m$; that satisfying the following conditions (8) with spectral coefficients (15).

3. Calculate the realization of the stochastic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by formula (11) in given point $(r_i, \theta_j, \varphi_p)$, $i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, G; p = 1, 2, \dots, P$ in the 3D observations area by means of substituting in it values from the previous items 1, 2 and 3, numbers N and sequences of Gaussian random variables.

4. Check whether the realization of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ generated in step 4 fits the data by testing the corresponding statistical characteristics (distribution and correlation function).

The statistical simulation of realizations of the Gaussian isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ with "cubic" correlation function can be done by means of this algorithm.

Note that the procedure can be applied to random fields with different type of distribution. Then the sequences of random variables $\{ \zeta_{k,i}^l(r), i = 1, 2; k = 0, 1, 2, \dots, N(r, \varepsilon) \}$ must be distributed according to the appropriate distribution type.

The original Spectr software, based on the results of the statistical data processing and the mentioned algorithm for the simulation values of such data realization in the 3D area, was developed in Python, where selected "cubic" type correlation function (4) was used. We calculate realizations of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ in 100 points for each of 3 observations levels $(r_i, \theta_j, \varphi_p)$, $i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, G; p = 1, 2, \dots, P$ in three-dimensional area by means of this software. Based on these realizations, a statistical estimate of the correlation function was obtained. This estimate compares with a given "cubic" type correlation function (4) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$ and provides a statistical analysis of the adequacy of realizations. The constructed variogram of these realizations on the studied area (Fig. 6) has an adequate approximation by theoretical variogram, which is associated with a "cubic" correlation function. The results show that the chosen data model on the density of chalk layers at the Rivne NPP site is quite adequate. The Spectr

"cubic" type correlation function (4) by the partial sums $\xi(r, \theta, \varphi)$ has the following representation:

$$M [\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)]^2 \leq \frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3,$$

where

mathematical expectation and the "cubic" correlation function $B(\rho)$ (4) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$.

Algorithm:

1. Natural number N (border of summation) is chosen according to necessary accuracy $\varepsilon > 0$ of approximation the model (11) mentioned below:

$$\frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3 \leq \varepsilon, \quad (18)$$

where

software developed for generating such realizations of the random field works with sufficient accuracy.

The results, obtained using additional modeling procedures, are shown in Fig. 6 a presents an example of constructed chalky strata density map according to observations data boreholes (averaged data over the years to 29 boreholes at a depth of 28 m) by Surfer software. Using available data, the accuracy of this design cannot provide a reliable characterization of the state of the chalk layers, since the number of measurement results is insufficient.

In Fig. 6 b presents contours of equal chalky strata density values based on simulation data, including values of anchor boreholes by calculating spectral coefficients of the "cubic" type. In addition, the output data (100 simulated values in the intervals between observation points of this level) can have more reliable approximation, that allows for more informed decisions about the state of chalky strata and identifies places for testing and additional research.

The following results, which were obtained using the simulating procedure for boreholes of observations data (averaged data for years up to 29 boreholes at a depth of 29 m, are displayed in Fig. 7. In Fig. 7a presents an example of a constructed map of the density of chalky strata according to observations for this data by Surfer software. In Fig. 7b presents contours of equal density values of chalky strata, which are based on simulation data, including values of the anchor boreholes. In addition, the output data (100 simulated values in intervals between observation points of this level) can have a more reliable approximation, which allows making more informed decisions about the state of chalky strata.

Finally, the results, that were obtained using the simulation procedure for boreholes of the observational data (averaged data over the years for 29 boreholes at a depth of 30 m, are shown in Fig. 8. Fig. 8 a shows an example of constructed map of the density of chalky strata according to observations of these data by the Surfer software. In Fig. 8b presents contours of equal density values of chalky strata, which are based on simulation data, including values of anchor boreholes. In addition, the output data (100 simulated values in the intervals between the observation points of this level) can have a more reliable approximation, which allows making more informed decisions about the state of chalky strata.

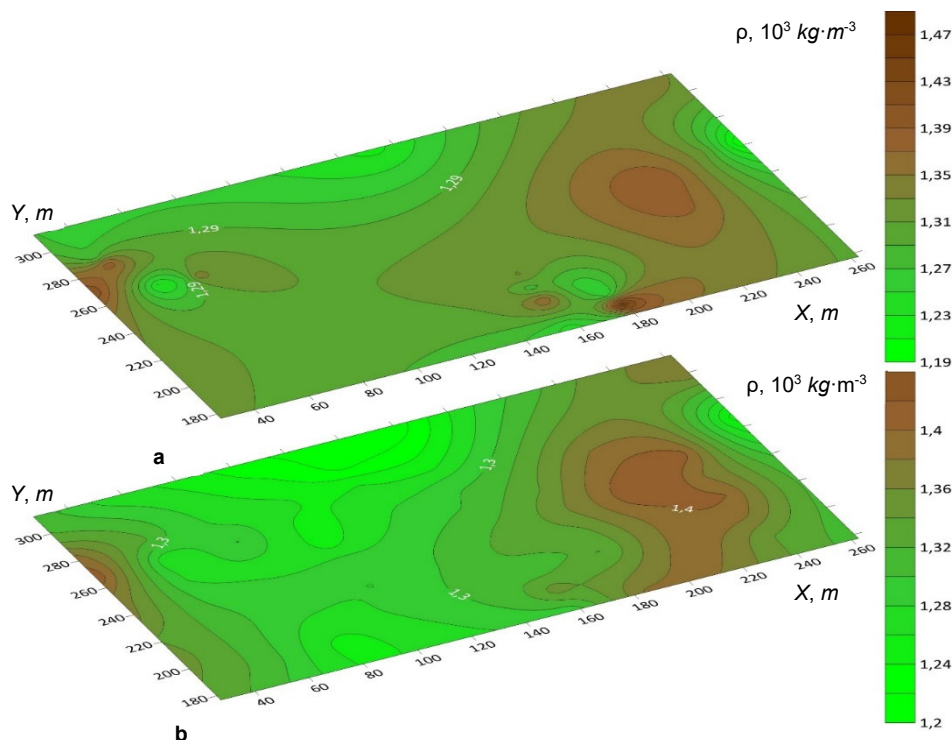


Fig. 6. The distribution of chalky strata density is on the industrial area of Rivne nuclear power plant at a depth of 28 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational boreholes over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure boreholes by spectral coefficients the "cubic" type

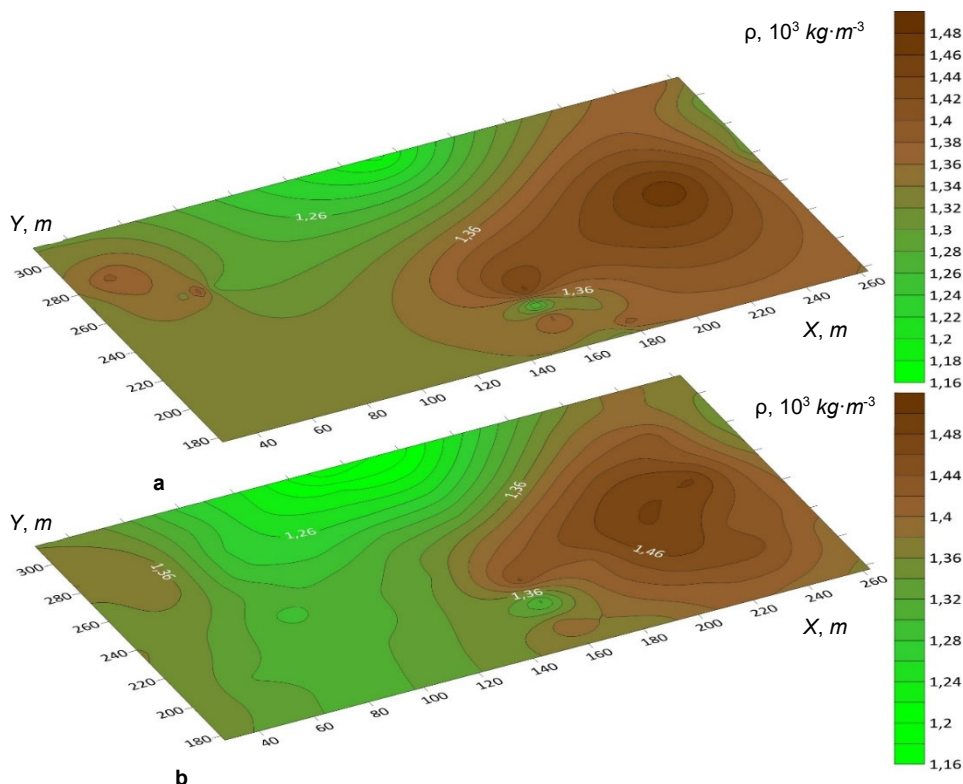


Fig. 7. The distribution of chalky strata density is on the Rivne NPP object at a depth of 29 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational boreholes over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure boreholes by spectral coefficients the "cubic" type

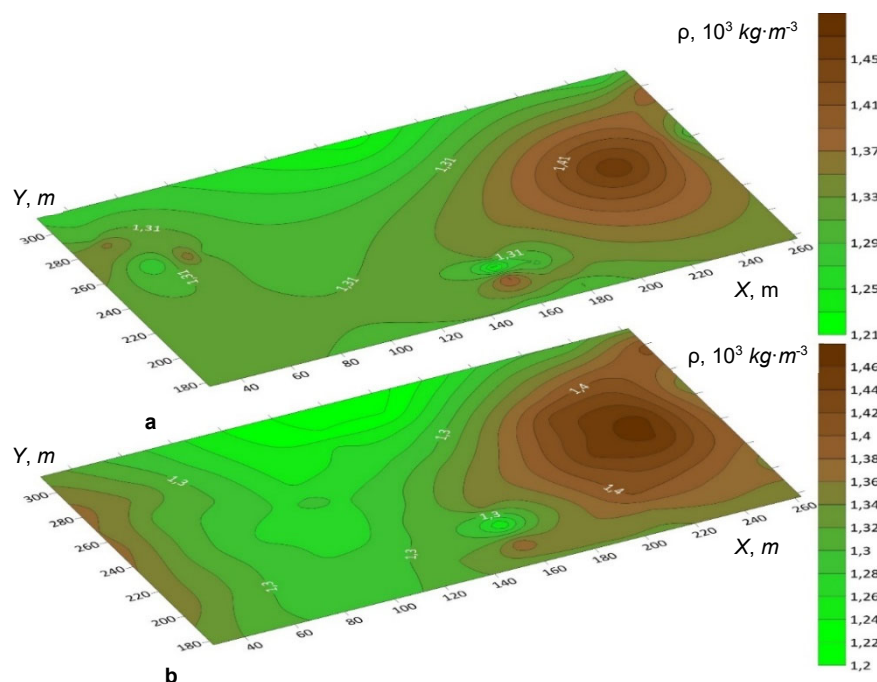


Fig. 8. The distribution of chalky strata density is on the industrial area of Rivne nuclear power plant at a depth of 30 m from the surface, according to (a) the averaged data of 29 observational boreholes over 1984–2004 years, for (b) the simulated data that based on the values in secure boreholes by spectral coefficients the "cubic" type

The statistical evaluation of the correlation function was obtained for the simulated realizations of the density distribution data of chalky strata in the 3D zone at the Rivne NPP facility. This estimate compares with a given theoretical "cubic" correlation function (4) at the value of parameter $a \approx 1,25 \cdot 10^{-2}$ and ensures the adequacy of realizations on their statistical analysis. The constructed variogram of these realizations in the studied area (Fig. 5) has an adequate approximation by the theoretical variogram, which is associated with a "cubic" correlation function. The results show that the chosen model of the correlation function of the random component of the data is sufficiently adequate and the developed Spectr software for generating realizations works with sufficient accuracy.

Discussion and conclusions

The theory, methodology and procedure of statistical simulation of random fields in a three-dimensional area using the optimal in the mean square sense "cubic" correlation function allows significantly increasing the effectiveness of monitoring observations on the territory of potentially dangerous objects. This makes it possible to simulate values in the area between regime observation grids and abroad, more adequately describe 3D density data of chalky strata in the industrial area of Rivne nuclear power plant. It should be noted that the variogram of input data has the best approximation of the theoretical variogram, which is associated with a "cubic" correlation function with a mean square deviation of 0,00136, compared to the mean square approximation for the Cauchy correlation function of 0,002816.

The method of statistical simulation of random fields with the "cubic" correlation functions allows supplementing the data with a given accuracy. It can also be used to detect abnormal areas when studying geophysical parameters in three-dimensional space.

There are many other areas of statistical simulation of random fields in a three-dimensional area methods application in geosciences. Among them primary are soil science and environmental magnetism (Menshov et al., 2015).

Authors' contribution: Zoya Vyzhva – problem formulation, development of analytical expressions for the model, selection of scientific novelty, formal analysis, methodology, review and editing; Vsevolod Demidov – review of publications, data processing, conclusions, refinement and editing; Andriy Vyzhva – statistical modeling algorithm development, editing.

References

- Chiles, J. P., Aug, C., Guillen, A., & Lees, T. (2005). Modelling the geometry of geological units and its uncertainty in 3D from structural data: The potential-field method. In R. Dimitrakopoulos (Ed.), *Orebody Modelling and Strategic Mine Planning Uncertainty Management Models, Spectrum Series 14*, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (pp. 329–336). Victoria.
- Chiles, J. P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty* (2-nd Ed.). JohnWiley&Sons, Inc.
- Emery, X., & Lantuejoul, C. (2006). TBSIM: A computer program for conditional simulation of three-dimensional Gaussian random fields via the turning bands method. *Computers & Geosciences*, 32(10), 1615–1628. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.03.001>
- Guyon, X. (1993). *Champs Aléatoires sur un Réseau. Modélisations, Statistique et Applications*. Techniques Stochastiques. Masson.
- Mantoglov, A., & Wilson, J. L. (1981). Simulation of random fields with turning bands method. *MIT Ralph M. Parsons Lab. Hydrol. and Water Syst. Rept.*, 264, 199 p.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., & Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59, 614–627.
- Tolosana-Delgado, R., & Mueller, U. (2021). Geostatistics for Compositional Data with R. (*Chapter: Compositional Direct Sampling Simulation*), 187–207. SpringerLink. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-82568-3_10
- Vyzhva, Z. O. (2003). About Approximation of 3D Random Fields and Statistical Simulation. *Random Operator and Stochastic Equation*, 4(3), 255–266.
- Vyzhva, Z. O. (2011). *The Statistical modeling of random processes and fields. Obrii* [in Ukrainian]. [Вижва, З. О. (2011). *Статистичне моделювання випадкових процесів та полів*. Обрії].
- Vyzhva, Z. O. (2021). *The Statistical modeling in geology*. PPC "Kyiv University" [in Ukrainian]. [Вижва, З. О. (2021). *Статистичне моделювання в геології*. ВПЦ "Київський університет"]. https://mechmat.knu.ua/wp-content/uploads/2022/12/posibnyk_vyzhva_z.pdf

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2013). About methods of 3D dataset statistical simulation on Rivne NPP example. *Geoinformatics. XII International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2014a). The investigation of chalk layer density on Rivne NPP industrial area territory by Monte Carlo method using 3D models. *Geoinformatics*, 3(51), 47–56 [in Ukrainian]. [Вижва, З. О., Демидов, В. К., & Вижва, А. С. (2014а). Дослідження густини крейдяної товщі методом Монте-Карло на промшайданчику Рівненської АЕС із застосуванням 3D-моделей. *Геоінформатика*, 3(51), 47–56].

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2014b). Monte Carlo method and Cauchy model identifying chalk layer density on Rivne NPP. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(65), 62–67 [in Ukrainian]. [Вижва, З. О., Демидов, В. К., & Вижва, А. С. (2014b). Дослідження густини крейдяної товщі методом Монте-Карло на промшайданчику Рівненської АЕС із застосуванням моделі Коші. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(65), 62–67].

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2018). About statistical simulation methods of random fields on the sphere by the aircraft magnetometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(82), 107–113.

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2019). About statistical simulation algorithm of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 13–16 May 2019, Kiev, Ukraine.

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2020a). The method of 3D dataset statistical simulation with "cubic" correlation function on Rivne NPP example. *15th International Conference on Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*.

Vyzhva, Z. O., Demidov, V. K., & Vyzhva, A. S. (2020b). The statistical simulation of dataset in 3D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(91), 85–93.

Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics* (3-rd Ed.). Springer-Verlag.

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons.

Yadrenko, M. Y. (1983). *Spectral theory of random fields*. Optimization Software Inc., Publications Division.

Отримано редакцією журналу / Received: 03.03.24

Прорецензовано / Revised: 14.07.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.06.24

Зоя ВИЖВА, д-р фіз.-мат. наук, проф.

ORCID ID: 0000-0002-6338-3892

e-mail: zoya_vyzhva@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Всеволод ДЕМИДОВ, канд. фіз.-мат. наук, доц.

ORCID ID: 0009-0003-9472-6530

e-mail: demidov@knu.ua

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Андрій ВИЖВА, канд. фіз.-мат. наук, гол. спеціаліст

ORCID ID: 0009-0003-6699-5848

e-mail: andrii.vyzhva@ugv.com.ua

Науково-дослідний інститут "УкрНДІгаз, Київ, Україна

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДАНИХ У 3-D ОБЛАСТІ З "КУБІЧНОЮ" КОРЕЛЯЦІЙНОЮ ФУНКЦІЄЮ НА ПРИКЛАДІ ГЕОФІЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ РІВНЕНСЬКОЇ АЕС

В с т у п . Розроблено модель й алгоритм статистичного моделювання даних у 3D області з використанням оптимальної в середньому квадратичному наближенні "кубічної" кореляційної функції. Наведено приклад доповнення змодельованими даними результатів геофізичних досліджень карстово-суфозійних явищ у задачі моніторингу густини крейдяної товщі на території Рівненської АЕС.

На території розміщення Рівненської АЕС проведено комплекс геофізичних досліджень. Серед таких моніторингових спостережень найбільший інтерес викликають радіоізотопні дослідження густини та вологості ґрунтів за периметром збудованих споруд. При цьому виникла проблема доповнення моделюванням даних, які отримано під час контролю зміни густини крейдяної товщі на території досліджуваного промшайданчика з використанням радіоізотопних методів по сітці, що охоплювала 29 свердловин.

М е т о д и . Зазначену проблему в роботі було розв'язано методом статистичного моделювання, що надає можливість відображати явище (випадкове поле об'єкта дослідження у тривимірній області) у будь-якій точці області спостереження. На основі спектрального розкладу випадкових полів у 3D-просторі побудовано статистичну модель розподілу усередненої густини крейдяної товщі у 3D області спостереження.

Р е з у л ь т а т и . Сформульовано алгоритм статистичного моделювання випадкових полів з "кубічною" кореляційною функцією. Отримано на базі розробленого програмного забезпечення додатково змодельовані реалізації випадкової складової предмета дослідження на сітці спостережень необхідної детальності та регулярності. Проведено статистичний аналіз результатів чисельного моделювання розподілу усередненої густини крейдяної товщі та їхню перевірку на адекватність.

В и с н о в к и . Метод статистичного моделювання випадкових полів з "кубічними" кореляційними функціями дає змогу доповнювати дані з достатньою точністю.

К л ю ч о в і с л о в а : статистичне моделювання, "кубічна" кореляційна функція, спектральний розклад, кондиційність карт.

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

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

УДК 528.8+631.4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.106.13>

Vitalii ZATSEKOVNYI¹, DSc (Engin.), Prof.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Mauro DE DONATIS², (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-9721-1095
e-mail: mauro.dedonatis@uniurb.it

Liudmyla PLICHKO¹, PhD
ORCID ID: 0000-0001-6779-0236
e-mail: plichkoL@knu.ua

Stanislav SAKHNIUK¹, Student
ORCID ID: 0000-0002-5779-322X
e-mail: sakhnyuk2003@ukr.net

Natalia ODARCHUK³, PhD (Phil.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-2647-2159
e-mail: natalylutsk@gmail.com

Tetiana MIRONCHUK¹, PhD (Phil.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-5923-1028
e-mail: tatianakiev99@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology, Kyiv, Ukraine
²University of Urbino Carlo Bo, Department of Pure and Applied Sciences, Urbino, Italy
³Lesya Ukrainka Volyn National University, Lutsk, Ukraine

USING REMOTE SENSING TECHNOLOGIES FOR MONITORING URBAN HEAT ISLANDS

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

Background. The urbanization process is accelerating every day, which entails significant changes in the natural landscape. This leads to microclimatic changes, air pollution, thermal effect, etc. Due to air pollution by man-made emissions in urbanized areas, the thermal regime is changing; the concentration of carbon dioxide and water vapor has now reached 90 % of the total amount of pollutants. As a result, another problem arises that contributes to global warming – the "greenhouse effect". Elevated air temperatures affect human health leading to breathing problems, seizures, heat and sunstroke, heat stress, and increased mortality. Considering the potential danger of elevated air temperatures caused by urban heat islands affecting the lives of residents, an effective and relevant method for surface temperature analysis and heat island location determination should be developed.

Methods. During urban heat island monitoring, the main factor of analysis is surface temperature, which was determined in the study using indices such as: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI) and Normalized Difference Built-up Index (NDBI).

Results. This paper describes a study of the distribution of urban heat islands in three European capitals, including Kyiv, Oslo and Rome, from May 2013 to August 2023. Using the capabilities of the GoogleEarthEngine cloud platform and data from the Landsat 8 OLI/TIRS satellite, the condition of green spaces, the number of impervious surfaces and indices of surface temperatures (LST) were compared, resulting in maps of the distribution of urban heat islands (UHIs) in the areas of selected cities and towns demonstrating quantitative changes.

Conclusions. Thus, the study showed a decrease in the number of urban heat islands along with impervious surfaces in the city of Kyiv by 4 %. At the same time, Rome and Oslo experienced an increase in the number of urban heat islands along with impervious surfaces. The data obtained prove the feasibility of using the chosen research method and can be used to assess the environmental condition, identify risk zones, and develop effective measures to further prevent the spread of UHI in megacities.

Keywords: urban heat island, surface temperatures, impervious surfaces, green spaces, Landsat 8 OLI/TIRS, GoogleEarthEngine, Remote sensing, GIS.

Background

Over the past decades, human activities have led to unprecedented climate change and environmental degradation, making global warming and energy shortages extremely visible. As a consequence, there have been significant changes in people's attitudes and behavior prompting them to take strict measures to avoid further development of environmental disaster, one of which is reducing carbon emissions.

The urbanization process is accelerating every day, so this rapid development is turning the natural landscape into an artificial one (Ghosh, 2019). In turn, the growth of urbanization entails significant changes in the natural landscape. This leads to microclimatic changes, air pollution, thermal effect, etc. An urban heat island (UHI) is an area of a city whose air temperature exceeds the suburban temperature by 4 degrees or more (Solecki et al., 2011). Due to air pollution by man-made emissions in urbanized areas, the thermal regime is changing; the concentration of carbon dioxide and water vapor has now

reached 90 % of the total amount of pollutants. As a result, another problem arises that contributes to global warming – the "greenhouse effect". Elevated air temperatures affect human health leading to breathing problems, seizures, heat and sunstroke, heat stress and increased mortality (Sakhniuk et al., 2022).

Considering the potential danger of elevated air temperatures caused by urban heat islands affecting the lives of residents, an effective and relevant method for surface temperature analysis and heat island location determination should be developed.

The purpose of this work is to analyse the urban heat island problem using geographic information systems, technologies and publicly available remote sensing data to qualitatively and quantitatively analyse changes and conditions of impervious surfaces, and to investigate areas of interest as they are potentially susceptible to changes in surface temperatures over time. There should also be developed an effective algorithm of actions that will help solve the urban heat island issue. The research also aims to identify

© Zatserkovnyi Vitalii, De Donatis Mauro, Plichko Liudmyla, Sakhniuk Stanislav, Odarchuk Natalia, Mironchuk Tetiana, 2024

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

the relationship between the number and location of built-up areas in megacities and the spread of elevated temperatures as well as to propose an effective UHIs monitoring methodology to further prevent environmental disasters.

The objects of study in this work are surface temperatures, green spaces and built-up surfaces of such megacities as Kyiv, Oslo, and Rome.

The subject of the study is the monitoring of urban heat islands, their impact on residents, and the search for effective preventive solutions.

Methods

Despite concerns and attempts to limit global warming, temperatures in cities exceeded those in surrounding areas by an average of 4–5 °C, in some cases by 10 °C. This phenomenon is known as the urban heat island. In monitoring urban heat islands, the main factor to analyse is surface temperature, which is derived from satellites. Land surface temperature (LST), which is the radiant skin temperature of the Earth's surface and is determined by the energy exchange between the Earth's surface and atmosphere, regulates and impacts the biophysical and chemical processes of the Earth's system (Debele, & Beketie, 2024).

Hence, it is clear that the air temperature measured by weather stations and the temperature of the earth's surface obtained using satellite images (U.S. Geological Survey, 2018) are different concepts that must be clearly separated from each other in further work.

Therefore, having differentiated such concepts at first glance, it is necessary to highlight the order of actions necessary for a holistic and qualitative analysis of urban heat islands.

The first step involves collecting high-quality initial data that will make it possible to analyze changes over a certain period of time. Quality means the absence of clouds and distortions in the images, the complete location of the object of interest. In the case of UHIs analysis, the survey season is also important, since to correctly calculate LST it is necessary to choose a summer or winter period, for these seasons best reflect the temperature contrast.

The following steps, depending on the selected satellite, sensor and software in which the analysis will be carried out, can be the following:

- geometric and radiometric calibration of the image,
- restoration of pixels covered with clouds,
- visualization of a composite image from stripes.

In most cases, the vegetation map (NDVI) reflects heat islands quite accurately, since NDVI allows knowing the amount of photosynthetic active biomass in plants (OneSoil Blog, 2018). Therefore, the calculation of this index is the next step in the analysis of urban heat islands and their interaction with green spaces. This index is a measure of the difference in reflectivity between the red band (RED) and near-infrared (NIR) band of images. NDVI ranges from –1 to +1, with positive values indicating areas covered with vegetation and negative values indicating areas without vegetation.

This is calculated as follows:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

where NIR is the reflectance in the near infrared band; RED – reflectance in the red band.

When working with spectroradiometer data, simply select the desired band that will display the desired data, in the case of urban heat islands, usually this is the surface temperature band, depending on the data set.

Another way to calculate surface temperature is to use RED, NIR and TIR (thermal infrared) satellite input signals.

In this case, it is necessary to find the ratio of vegetation in a pixel using a previously defined vegetation index, namely its minimum and maximum values (Quintano et al., 2015).

$$p(v) = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2, \quad (2)$$

where NDVI_{min} is the minimum NDVI value; NDVI_{max} – maximum NDVI value.

Then, the emissivity of the earth's surface is required, which is found from the equation:

$$\varepsilon = mP(v) + n, \quad (3)$$

where m is the value of the soil emissivity and is equal to 0.004; n is the value of vegetation emissivity equal to 0.986.

The spectral irradiance value of the infrared thermal image is used to calculate the temperature. This temperature is also known as radiant or brightness temperature. For Landsat thermal infrared image data, the brightness temperature is given by (Sobrino, Jimenez-Munoz, & Paolini, 2004).

$$Tb = \frac{K2}{\ln\left(1 + \frac{K1}{L\lambda}\right)}, \quad (4)$$

where Lλ is the value of spectral irradiance; K1 and K2 are constants obtained from the Landsat image metadata file.

After determining the surface emissivity, the brightness temperature will be adjusted to obtain the surface temperature value. Land surface temperature (LST) is defined as follows:

$$LST = \frac{Tb}{1 + \left(\frac{\lambda Tb}{p}\right) \ln \varepsilon}, \quad (5)$$

where Tb is the value of the image radiation temperature; λ – value of the central wavelength of the thermal infrared range; ε – surface emissivity; p – became Stefan-Boltzmann (1.38.10–23J/K).

The remaining step in the search for urban heat islands is to calculate the urban thermal field deviation index (UTFVI), which varies in the formula given below and is assigned a high value for the six categories of the environmental assessment index (Tab. 1).

$$UTFVI = \frac{Ts - Tm}{Ts}, \quad (6)$$

where Ts is the temperature of the earth's surface; Tm is the average temperature of the earth's surface.

Table 1
UTFVI and Environmental Assessment Index threshold values

UTFVI	Urban Heat Island	Environmental Assessment Index
< 0,000	None	Excelent
0,000–0,005	Weak	Good
0,005–0,010	Medium	Quite Good
0,010–0,015	Strong	Not Good
0,015–0,020	Stronger	Poor
> 0,020	The strongest	Very poor

Once urban heat islands are located, visualized and classified into environmental assessment groups, quantitative and qualitative analysis of changes that may have occurred over time is possible. Thus, the main criteria for analysis will be the values of plant indices, including the previously mentioned NDVI and the equally important Leaf Area Index (LAI).

The Leaf Area Index shows the ratio of total leaf area to ground area. In turn, the amount of light intercepted, the nitrogen accumulated by it, the surface temperature, etc., depending on the area of the leaves (Fang et al., 2019). This index is a dimensionless coefficient, but it is possible to reduce its dimension (m²/m², ha/ha).

A special feature of LAI is that it is usually calculated based on the ratio of NDVI values and other coefficients, which in turn depend on the location where the leaf area index is needed to be calculated. That is, the formula for taking into account LAI values will be one when analyzing forests in temperate latitudes and the other one when analyzing savannas, etc. Therefore, when calculating LAI, it is important to correctly select the formula, which is provided for the green spaces of the study area.

It is also useful to calculate the areas of urban heat islands and compare the values for different years, since in this way we can observe the trend of changes in the area of interest.

It may also be useful to visualize temperature changes in graphs, calculate changes in the amount of vegetation and built surfaces using open databases, classify using standards or calculate impervious surface indices.

So another factor directly affecting surface temperatures, and therefore the spread of UHI, is the amount of impervious surface, which can be easily calculated using the Normalized Difference Built-up Index (NDBI).

NDBI calculation is an effective method for mapping urban built-up areas, calculated based on the image difference between NIR and MIR (mid-infrared) (Zha, Gao, & Ni, 2003). This index is obtained from the equation:

$$NDBI = \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR}, \quad (7)$$

where MIR corresponds to Landsat OLI band 6 (1.57–1.65 μm).

Index values range from -1 to $+1$, where negative values correspond to vegetation and water bodies, and positive values correspond to built-up areas (Zha, Gao, & Ni, 2003).

Using the Google Earth Engine (GEE) platform, which uses a combination of satellite imagery, Earth observation data and machine learning algorithms to allow users to identify and measure changes in land use, ecosystems and climate patterns on a global scale, it is possible to identify urban regions where to focus efforts should be made to reduce the impact of urban heat islands. Google Earth Engine relies on numerous technologies in the Google data center, such as the Flume Java framework, distributed databases Bigtable, Spanner (Chang et al., 2006), GEE is accessible through an API and web interface, allowing rapid prototyping and visualization of results.

Thus, high-quality and in-depth monitoring of urban heat islands can be carried out, which will allow analyzing trends that are spreading in the area of interest, selecting and timely applying preventive measures, etc.

Results

The study areas in this work were three European capitals – Kyiv, Oslo, and Rome. Each of the selected cities is a metropolis, respectively, most prone to the spread of UHIs.

The reason for choosing Rome as a territory for analysis was great historical status of the city, which, together with European standards, is the basis for serious restrictions on logging, and given the geographical location of this city, due to which residents suffer from heat in the summer, we would like to identify possible trends in temperature changes and factors that influenced this.

Oslo is known as the green European capital, so it is important to analyze the temperature regime in the city and compare the state of other capitals with the leader.

As for Kyiv, due to the irresponsibility of the authorities, the city is experiencing problems with massive illegal cutting of trees, accordingly serves as an example of a city that is experiencing changes in the amount of green spaces and impervious surfaces.

Kyiv and Rome are over a million people and have about three million inhabitants each, and also have many enterprises,

industrial production, and they are also large transport hubs through which supplies and transportation pass daily.

Oslo, in contrast, is much smaller in size, has only 702 thousand population, which since 2015 has prohibited private vehicles from traveling on public roads in the city center. Besides, since 2019 it has expanded this rule to a 60 km buffer zone.

All three capitals are located at different latitudes and form an imaginary triangle (Fig. 1). So, Kyiv is located at the latitude of $50^{\circ}27'16''$ N. and at the altitude of 187 meters above sea level. Oslo is located at the latitude of $59^{\circ}56'58''$ N. Rome, in turn, is located at the latitude of $41^{\circ}53'30''$ N. and at the altitude of 52 meters above sea level.

Accordingly, the meteorological conditions of these areas are different, which in turn gives us an excellent opportunity to analyze the distribution of urban heat islands in different climatic conditions, which also affect the state of vegetation, inhabitants, and surface temperature.

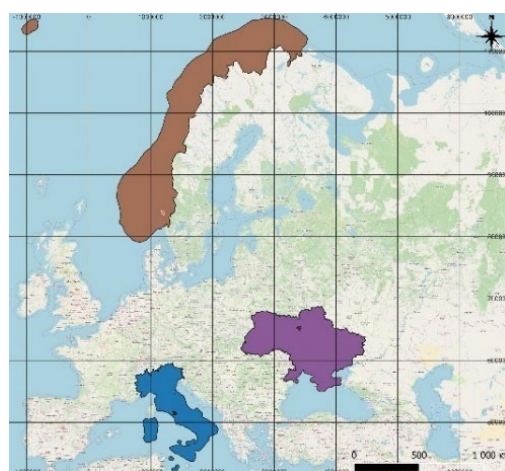


Fig. 1. Location of study areas according to OpenStreetMap

The climate of Kyiv is moderately continental, with mild winters and warm summers; the average temperature in July is about $+25^{\circ}\text{C}$. The climate of Rome is subtropical Mediterranean characterized by very long and hot summers, $+31^{\circ}\text{C}$ average temperatures in July, and mild, rainy winters. Oslo is located in a continental climate zone characterized by cool summers, the warmest month being July with an average temperature of $+17.8^{\circ}\text{C}$.

The issue of ecology is quite acute today, especially for megacities. The territories under consideration are no exceptions. But a serious advantage of these capitals is the large number of green spaces; more than 50 % of the area of Kyiv and Rome are forests, parks, squares, alleys, etc. As for Oslo, about 70 % of the territory is covered with green space, and recently the authorities have completely removed parking spaces in the city.

As European capitals of culture that attract visitors from all over the world have a correspondingly high level of tourism, and demonstrate different climatic conditions and decisions of city authorities, an analysis of the distribution of urban heat islands would be appropriate, and it would provide a basis for broader comparison.

According to the considered algorithm of actions, a code was written on the Google Earth Engine platform, so the first step was to load the geometry of the territory of interest, the analysis of which was carried out later. Optical and thermal channels were also scaled (Fig. 2).

```
var geometry = ee.FeatureCollection("users/sakhnyuk/Kyiv")
Map.addLayer(geometry, {}, 'geometry')
Map.centerObject(geometry, 9)

// Applies scaling factors.
function applyScaleFactors(image) {
  var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
  var thermalBands = image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0);
  return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .addBands(thermalBands, null, true);
}
```

Fig. 2. Code fragment with the definition of the area of interest

Subsequently, the obtained results of the processed code were exported in TIF format for each of the areas of interest. These files contain information about the Land surface temperature (LST) value and the Urban Thermal Field Variance Index (UTVFI) value for 2013 and 2023.

The obtained data was loaded into the ArcMap application for subsequent classification and mapping. Initially, the LST data was divided into six classes to better visualise temperature differences in different parts of metropolitan areas, and surface temperature maps were then created for each of the capitals (Fig. 3).

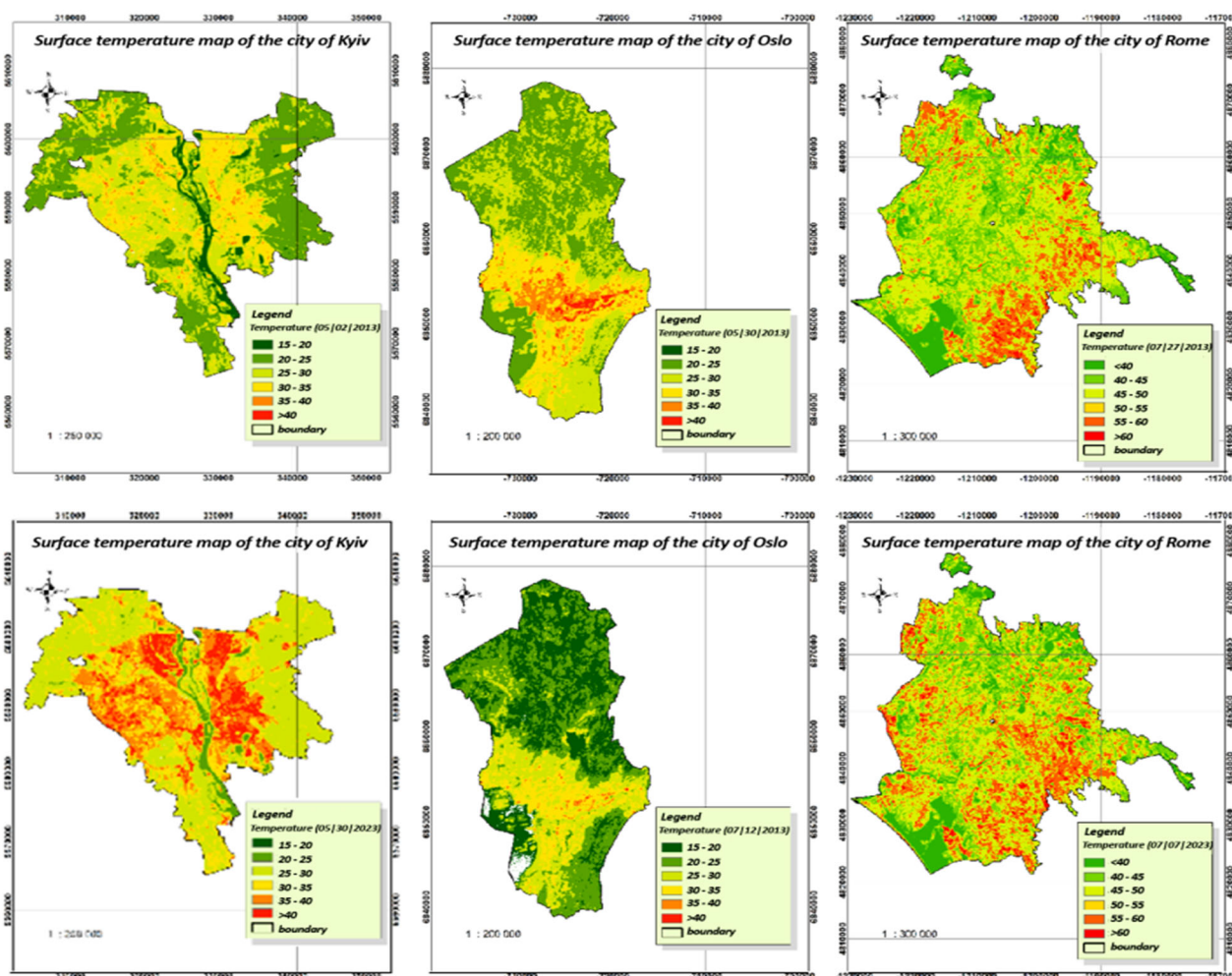


Fig. 3. Land surface temperature maps of selected cities made using Landsat 8 OLI/TIRS data. Date of access: 01/30/2024

Mapping land surface temperature of selected megacities, the approximate location of urban heat islands can be predicted, just as in the case of the vegetation index. It should also be noted that all cities except Oslo experienced a visual increase in surface temperatures, this is noticeable due to the increase in the number of hot color pixels.

The following step was to distribute the UTVFI data into six classes according to the level of Environmental

Assessment discussed earlier (Tab. 1), which in the future will also make it possible to calculate changes in the size of the UHIs. Based on the classification of the Urban Thermal Field Variance Index values, maps of the distribution of heat islands in each of the capitals for 2013 and 2023 were created (Fig. 4).

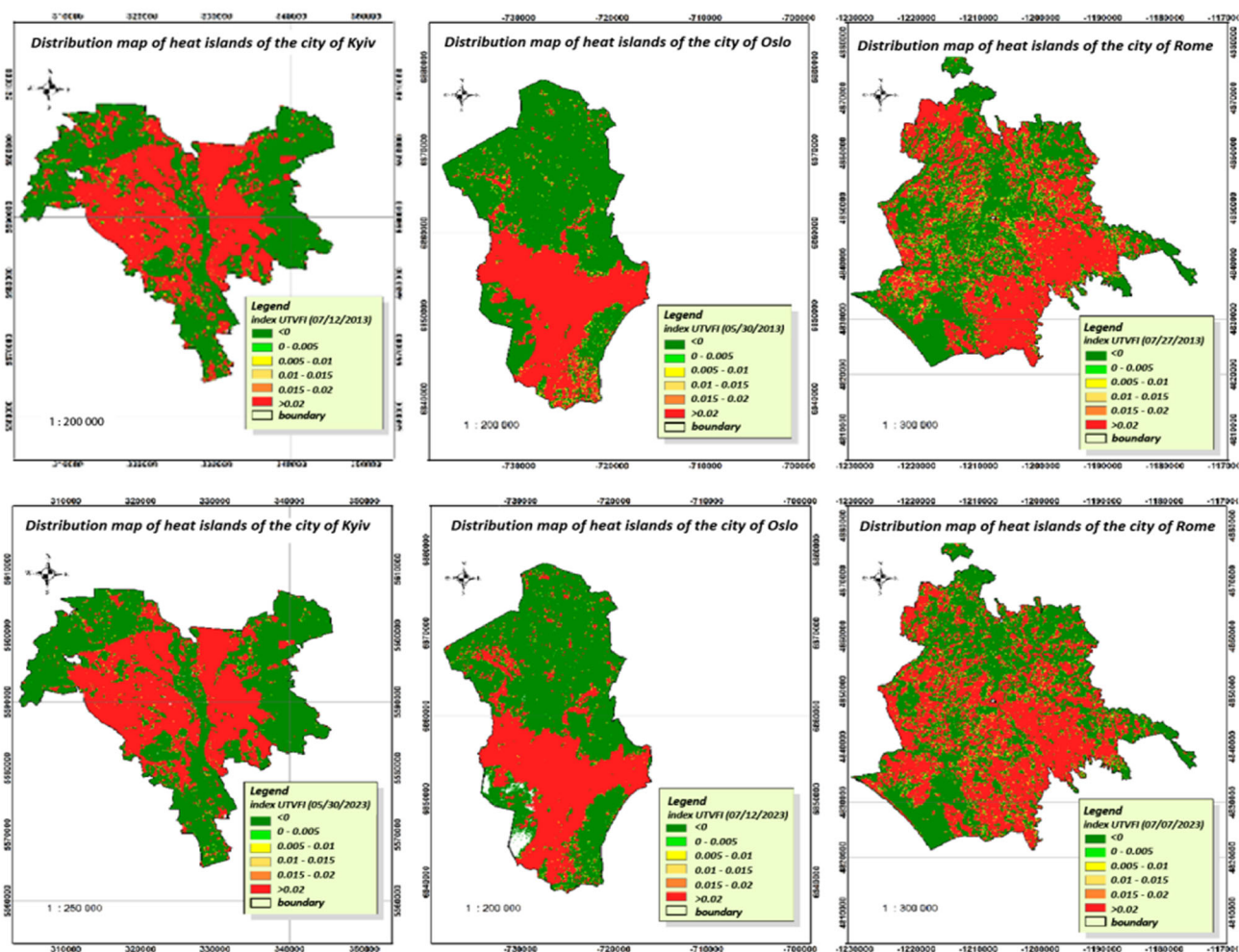


Fig. 4. Distribution maps of heat islands of selected cities made using Landsat 8 OLI/TIRS data. Date of access: 01/30/2024

As with Land surface temperature (LST) maps, visual changes in the UHI or an increase in the number of heat islands indicate a poor environmental assessment.

Since a detailed UHI analysis requires not only a qualitative assessment, but also a quantitative one, the next step was to calculate the areas occupied by the corresponding class of urban heat island in each year. This procedure was also performed in ArcMap using the Reclassify, Raster to Polygon, and Calculate Geometry tools.

Then, obtaining certain results regarding surface temperatures and urban heat islands and analysing them, it is possible to search for additional factors that could influence changes in the selected areas.

However, as previously noted, impervious surfaces have a significant impact on urban heat islands. Therefore, additional code was written and developed in GEE to calculate the development index for each city and the resulting values were subsequently exported to ArcMap.

The Normalized Difference Built-up Index (NDBI) values were similarly calculated from preliminary Landsat 8 OLI/TIRS data. Thus, maps were constructed to analyse and evaluate the distribution of urban development according to the interdependence of the distribution of elevated surface temperatures in selected capital cities.

In each case, the sums of land areas of each class (high, low vegetation, water bodies and urban development) were calculated. Thus, statistical data on changes in the area of built-up surface were obtained.

Exploring the territories of the cities of Oslo, Kyiv and Rome, there was carried out an analysis of changes in surface temperature and the distribution of urban heat islands in the period from 2013 to 2023 using data from Landsat 8 OLI/TIRS satellites. Although the changes in each city were different, certain trends were observed that influenced the spread and intensity of UHI (Fig. 5).

Analysing the results obtained, there could be observed an increase in the area of urban heat islands from 44 % in 2013 to 46 % in 2023 in Rome and from 35 % in 2013 to 37 % in 2023 in Oslo. Thus, the worst trend is in Rome, where the area of the strongest and worst heat islands according to environmental assessment has increased by 30 sq.km.

Despite the global increase in temperatures, some cities still manage to avoid increasing the area of UHI, among which is the capital of Ukraine (Fig. 6).

Analyzing these changes in the areas of impermeable surfaces over time (Fig. 7), there is a noticeable decrease in the values of the Normalized Difference Built-up Index in Kyiv, which could serve as a potential reason for the decrease in urban heat islands by 12.7 % of the total area of the city from 2013 to 2023. Note that this difference indicates an improvement in the ecological condition of the territory. Regarding the cities of Oslo and Rome, from 2013 to 2023 urban heat islands increased by 5.9 % (of the total area of the city of Oslo) and 12 % (of the total area of the city of Rome). In turn, the decrease in the number of impervious

surfaces could be caused by an increase in the overlying vegetation cover.

In contrast to Kyiv, two other European capitals experienced quite significant increases in impervious surfaces on their

territories of 100 sq.km. This exactly shows by how much the area of artificial surfaces increased in Rome, respectively by 28 sq.km more than in the capital of Norway.

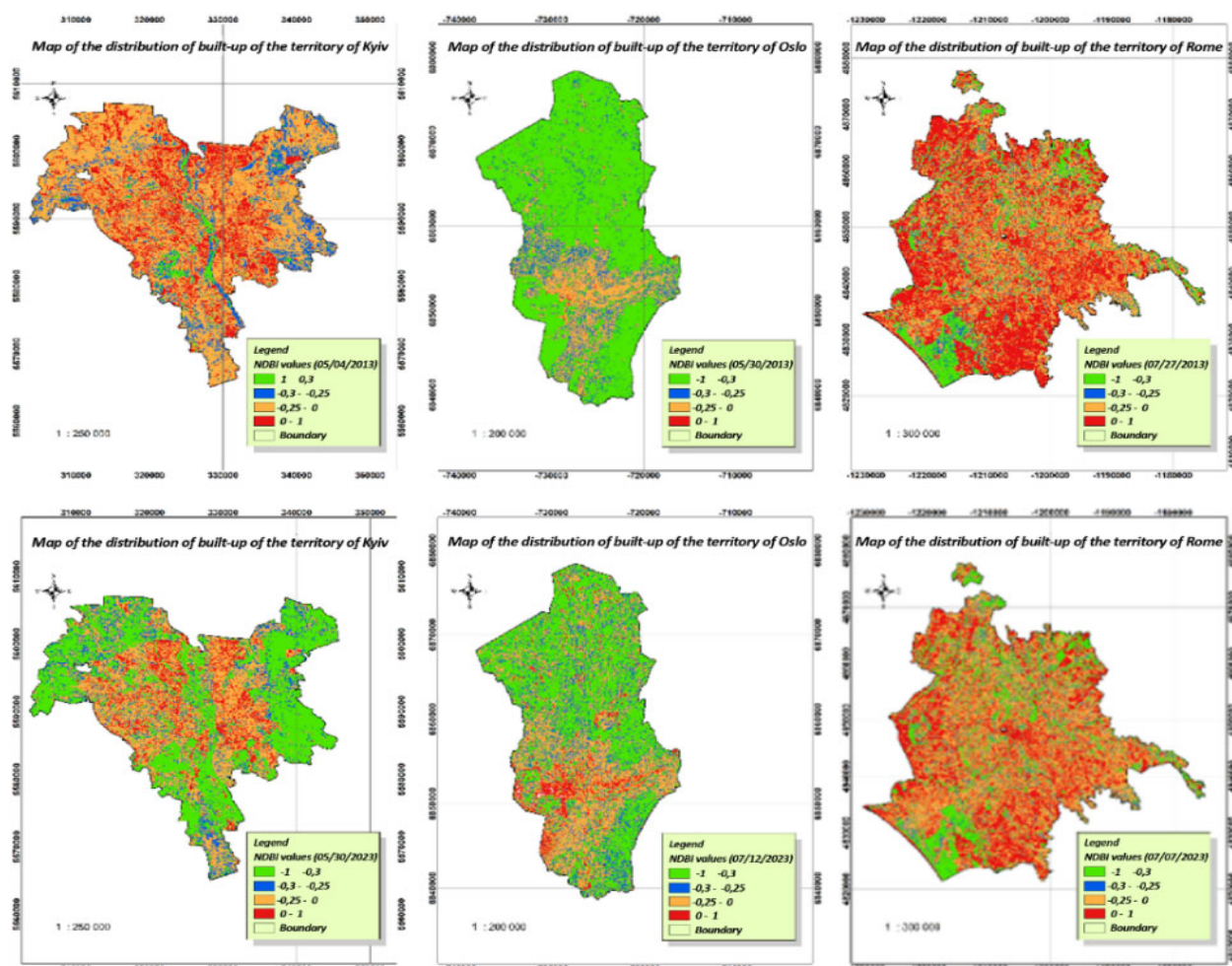


Fig. 5. Maps of the distribution of built-up of selected cities made using Landsat 8 OLI/TIRS data. Date of access: 01/30/2024

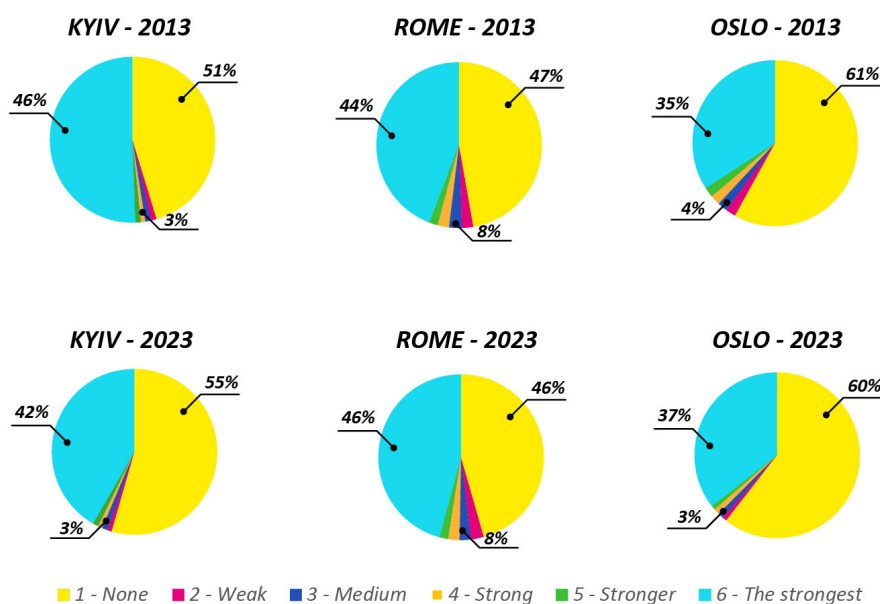


Fig. 6. Percentage charts of urban heat island area changes

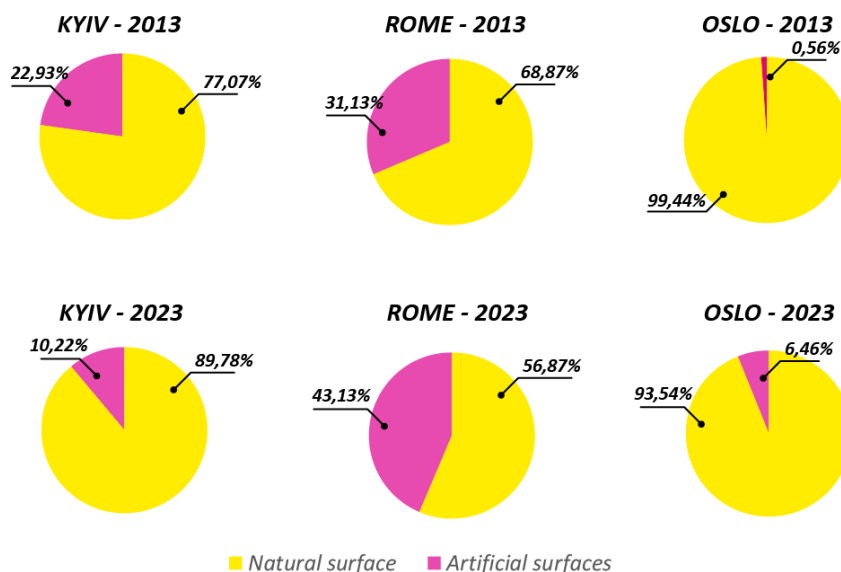


Fig. 7. Percentage charts of changes in the number of built-up surfaces

So, the territory of Kyiv, the city, shows a good trend in reducing the number of urban heat islands (by 30 sq.km in less than ten years), which is accompanied by a decrease in the number of impermeable surfaces.

As for Rome, the changes in the city are similar to those in Oslo, namely of a slight increase in the area of UHIs along with impervious surfaces.

Thus, comparing the trends in the distribution of urban heat islands and the amount of development, a possible relationship was assumed between these characteristics of the urban environment.

By investigating the distribution of urban heat islands in areas of interest, both negative and positive trends can be identified, which can serve as a good sign. In any case, it is necessary to remember about possible errors in the source data when performing calculations, etc.

Based on the remote sensing data reviewed, a relationship was assumed between the spread of UHIs and the increase in impervious surfaces. An effective algorithm of actions has been considered and applied allowing for high-quality and quick analysis and control of the temperature regime of the city. This, in turn, it makes it possible to create a unified geographic information system that can help local authorities ensure the comfort and safety of residents.

Discussion and conclusions

Thus, considering the potential danger involved that urban heat islands may pose for residents of modern megacities, it is important to calculate, develop, and implement a number of precautionary measures that will allow anticipating and avoiding negative consequences of these processes.

Using the example of European capitals such as Oslo, Kyiv, and Rome, the long-term influence of one of the factors (impermeable surfaces on urban heat islands) was analysed in detail, namely: using data from the Landsat 8 OLI / TIRS satellite, maps of surface temperatures were constructed allowing us to assume the dependence of LST on the number of impervious surfaces, particularly, a decrease in the number of UHIs simultaneously with a decrease in the number of impervious surfaces and vice versa.

The area of urban heat islands was found to increase from 44 % in 2013 to 46 % in 2023 in Rome and from 35 % in 2013 to 37 % in 2023 in Oslo. Thus, the worst trend is in Rome, where the area of the strongest and worst heat

islands according to environmental assessment has increased by 30 sq.km.

The data obtained indicate a noticeable decrease in the values of the Normalized Difference Built-up Index in Kyiv, which could serve as a potential reason for the decrease in urban heat islands by 12.7 % of the total area of the city from 2013 to 2023. Note that this difference indicates an improvement in the ecological condition of the territory. Regarding the cities of Oslo and Rome, from 2013 to 2023 urban heat islands increased by 5.9 % (of the total area of the city of Oslo) and 12 % (of the total area of the city of Rome). In turn, the decrease in the number of impervious surfaces could be caused by an increase in the overlying vegetation cover.

From the above mentioned opportunities and advantages provided to us by modern technologies and methods of research and monitoring of heat islands, it becomes clear that this process should be carried out precisely on the basis of Earth remote sensing data using geographic information systems.

The use of remote sensing and the products mentioned in this investigation should speed up and simplify the process of monitoring temperature regimes in cities and beyond.

The result of this investigation is a specific algorithm for monitoring urban heat islands, selected on the basis of the analysed scientific material, which proves the feasibility of further analysis of the relationship between two modern problems in megacities, that threaten the population more and more every day.

Using the collected materials, it becomes possible to search and evaluate the influence of constant and uncontrolled urbanization on the formation of the urban heat island effect, since, as mentioned earlier, it is the increase in population that is one of the main reasons for the formation of UHIs. Coverage of these issues provides a future basis for further research and review of its results.

Authors' contribution: Vitalii Zatserkovnyi – conceptualization, formal analysis, methodology, review and editing; Mauro De Donatis – conceptualization, methodology; Liudmyla Plichko – review of publications, selection of scientific novelty, conclusions, revision and editing; Stanislav Sakhniuk – formal analysis, data treating; Natalia Odarchuk – revision and editing; Tetiana Mironchuk – revision and editing.

References

- Chang, F., Dean, J., Ghemawat, S., Hsieh, W. C., Wallach, D. A., Burrows, M., Chandra, T., Fikes, A., & Gruber, R. E. (2006). Bigtable: A Distributed Storage System for Structured Data. *7th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, (pp. 205–218). Google, Inc. <https://research.google.com/archive/bigtable-osdi06.pdf>
- Debele, G. B., & Beketie, K. T. (2024). Studying the spatial non-stationary relationships of some physical parameters on the Earth's surface temperature using GWR in Upper Awash basin, Ethiopia. *Scientific African*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e02052>.
- Fang, H., Baret, F., Plummer, S., & Schaepman-Strub, G. (2019). An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. *Reviews of Geophysics*, 57. <https://doi.org/10.1029/2018RG000608>
- Ghosh, I. (2019). *The Dramatic Global Rise of Urbanization (1950–2020)*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2019/09/mapped-the-dramatic-global-rise-of-urbanization-1950-2020>
- OneSoil Blog. (2018). *What the NDVI index is and how it makes a farmer's life easier*. <https://blog.onesoil.ai/en/what-is-ndvi>
- Quintano, C., Fernández-Manso, A., Calvo, L., Marcos, E., & Valbuena, L. (2015). Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 36, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.10.015>

- Sakhniuk, S., Tovstonoh, D., Monastyrova, O., & Zatserkovnyi, V. (2022). Monitoring of urban heat islands using remote sensing technologies. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, November 2022* (p. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580055>
- Sobrino, J. A., Jimenez-Munoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90, 434–440. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Solecki, W. D., Rosenzweig, C., Parshall, L., Pope, G., Clark, M., Cox, J., & Wiencke, M. (2005). Mitigation of the heat island effect in urban New Jersey. *Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards*, 6(1), 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.hazards.2004.12.002>
- U. S. Geological Survey. (2018). *USGS EROS Archive – Landsat Archives – Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) Level-1 Data Products*. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-8-oli-operational-land-imager-and-overview>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>

Отримано редакцією журналу / Received: 19.05.24

Прорецензовано / Revised: 25.06.24

Схвалено до друку / Accepted: 30.08.24

Віталій ЗАЦЕРКОВНИЙ¹, д-р техн. наук, проф.
ORCID ID: 0009-0003-5187-6125
e-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com

Мауро ДЕ ДОНАТІС², доц.
ORCID ID: 0000-0002-9721-1095
e-mail: mauro.dedonatis@uniurb.it

Людмила ПЛІЧКО¹, д-р філософії
ORCID ID: 0000-0001-6779-0236
e-mail: PlichkoL@knu.ua

Станіслав САХНІУК¹, студ.
ORCID ID: 0000-0002-5779-322X
e-mail: sakhniuk2003@ukr.net;

Наталія ОДАРЧУК³, канд. філол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-2647-2159
e-mail: natalylutska@gmail.com

Тетяна МІРОНЧУК¹, канд. філол. наук, доц.
ORCID: 0000-0002-5923-1028
e-mail: tatianakiev99@gmail.com

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

²Університет Урбіно "Карла Бо", Урбіно, Італія

³Волинський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна

ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ МІСЬКИХ ОСТРОВІВ ТЕПЛА

Вступ. Процес урбанізації прискорюється з кожним днем, що спричиняє значні зміни у природному ландшафті. Це призводить до мікрокліматичних змін, забруднення повітря, теплового ефекту тощо. Через забруднення повітря техногенними викидами в урбанізованих районах змінюється тепловий режим – концентрація вуглекислого газу та водяної пари зараз досягла 90 % від загальної кількості забруднювальних речовин. Як наслідок, виникає ще одна проблема, що сприяє глобальному потеплінню – "парниковий ефект". Підвищені значення температури повітря впливають на здоров'я людини, призводять до проблем з диханням, судом, теплового та сонячного ударів, теплового стресу та підвищеної смертності. З огляду на потенційну небезпеку підвищених значень температур повітря, викиданих міськими островами тепла, що впливають на життя мешканців, необхідно розробити ефективний та актуальний метод аналізу температури поверхні та визначення розташування теплових островів.

Методи. Під час моніторингу міських островів тепла головним фактором для аналізу є поверхнева температура, яку визначали в дослідженні за допомогою таких індексів, як: нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), індекс дисперсії міського теплового поля (UTVFI) та нормалізований диференційний індекс забудови (NDBI).

Результати. У пропонуваній роботі описано дослідження поширення міських островів тепла у трьох європейських столицях, серед яких Київ, Осло та Рим, у період із травня 2013 р. по серпень 2023 р. Користуючись можливостями хмарної платформи Google Earth Engine та даними супутника Landsat 8 OLI/TIRS було здійснено порівняння стану зелених насаджень, кількості непроникних поверхонь і показників поверхневих температур (LST), унаслідок чого побудовано карти поширень міських островів тепла (MOT) на територіях обраних міст і сформовано відсоткові діаграми, що демонструють кількісні зміни.

Висновки. Дослідження показало зменшення кількості MOT разом з непроникними поверхнями на території міста Києва на 4 %. Водночас Рим та Осло зазнали збільшення кількості MOT разом з непроникними поверхнями. Отримані дані доводять доцільність використання обраного методу дослідження та можуть бути застосовані для оцінювання екологічного стану, визначення зон ризику та розроблення ефективних заходів подальшого запобігання поширенням MOT у мегаполісах.

Ключові слова: міський острів тепла, поверхневі температури, непроникні поверхні, зелені насадження, Landsat 8 OLI/TIRS, Google Earth Engine, дистанційне зондування Землі, ГС.

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

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

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 3(106)

Відповідальний за випуск Олександр Меньшов
Chief publication manager O. Menshov

Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова
Computer processing of the articles by O. Kozionova

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 12,44. Наклад 300. Зам. № 224-11136.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № ГлЗ.
Підписано до друку 02.09.24

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; (38044) 239 31 28
e-mail: vpc@knu.ua; vpc_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
http: vpc.knu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02