

УДК 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102>

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); Веснавер Альдо , д-р філософії, проф. (Італія); Вижва Зоя , д-р фіз.-мат. наук, проф. (Україна); Діндароглу Тургай , д-р філософії, проф. (Туреччина); 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); 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); Спасов Сімо , д-р філософії, проф. (Бельгія); Шабатура Олександр , д-р геол. наук, доц. (заст. головн. ред.) (Україна); Шевченко Олексій , д-р геол. наук, ст. наук. співроб. (Україна); Шевчук Віктор , д-р геол.-мінералог. наук, проф. (Україна); Шмідт Вольфмар , 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" 31.08.23 (протокол № 1)
Зареєстровано	Міністерством юстиції України Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 25418-15358 ПР від 03.02.23
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 внесено 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(102)/2023

Established in 1958

UDC 504+550+551+552+624

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102>

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); Dindaroğlu Turgay, PhD, Prof. (Turkey); 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); 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); Zeng Qingli, PhD (China); Vyzhva Zoya, DSc (Phys. & Math.), Prof. (Ukraine); Zacerkovniy Vitaliy, DSc (Tech.), Prof. (Ukraine); Zagnitko Vasyl, DSc (Geol. & Mineral.), Prof. (Ukraine)
Address	USI "Institute of Geology" 90, 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" 31.08.23 (protocol № 1)
Registered by	the Ministry of Justice of Ukraine Certificate of state registration № 25418-15358 NP dated 03.02.23
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

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

БАРАНОВ Володимир, АНТИПОВИЧ Яна, СТЕФАНКО Сергій Фрикційні явища у вугільних шахтах: причини, наслідки та вплив на газодинамічні явища	5
---	---

ГЕОФІЗИКА

БРИЦЬКИЙ Олександр, ЩЕРБИНА Сергій, ПІГУЛЕВСЬКИЙ Петро, ЛІСОВИЙ Юрій, ЧЕРЕВКО Ірина Новий лазерний підхід для оцінки сейсмічного ризику	10
СКАКАЛЬСЬКА Людмила, НАЗАРЕВИЧ Андрій, КОСАРЧИН Володимир Оцінки тріщинуватості та проникності порід у розрізах свердловин за прогнозною методикою	19
БЕЗРОДНА Ірина, БЕЗРОДНИЙ Дмитро Аналіз магнітної анізотропії зразків порід полігону Криворізької надглибокої свердловини	26
ТЛЕУБЕРГЕНОВА Айгерим, УМІРОВА Гульзада, МАУСИМБАЄВА Алія, ПОРТНОВ Василь Комплексний аналіз даних магніторозвідки та гравірозвідки на основі об'ємного гравімагнітного моделювання вздовж Геотраверса Шу-Сарису	31

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

МАНСУРОВ Мамай Геохімічна характеристика основних рудних компонентів Гошгарчайської порфірово-епітермальної системи (Малий Кавказ, Азербайджан)	39
---	----

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

МИХАЙЛОВ Володимир, ЄСЕНДОСОВА Айнель Порівняльна характеристика геологічної будови і свинцево-цинкової мінералізації Успенського (Центральний Казахстан) і Бергівського (Закарпаття) рудних районів	46
ЛИТВИНЮК Станіслав, КУРИЛО Марія, ВІРШИЛО Іван, БРАТАХ Михайло Базові ознаки класифікаційних систем як інструмент управління та інвестиційного аналізу проєктів надрокористування	61
ОХОЛІНА Тетяна, КУЗЬМАНЕНКО Галина Порівняльна геолого-економічна оцінка родовищ титану України на прикладі Новомиргородського розсіпного району	69

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

ЄМЕЛЬЯНОВ Володимир, НАСЄДКІН Євген, ФЕДОСЕЄНКО Сергій, КОШЛЯКОВА Тетяна Застосування гідроакустичних методів під час геохімічних досліджень розподілу забруднювачів у поверхневому шарі донних відкладів	74
---	----

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

ВИЖВА Зоя, ДЕМИДОВ Всеволод, ВИЖВА Андрій Статистичне моделювання випадкових полів із Гауссівською кореляційною функцією для дослідження даних магнітометрії	81
СТАРОДУБ Юрій, ГАВРИСЬ Андрій, КОЗІОНОВА Олеся Вивчення напружено-деформованого стану ґрунтів навантажених мостоінженерних споруд	88
АЗІМОВ Олександр, РОГОЖИН Олексій, ТРОФИМЧУК Олександр Концептуальний підхід до створення системи інформаційного забезпечення робіт щодо поводження з геологічним середовищем у контексті локалізації твердих побутових відходів	94

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

BARANOV Volodimir, ANTIPOVICH Yana., STEFANKO Serhii

Frictional phenomena in coal mines: reasons, consequences and influence
on gas dynamic and thermal phenomena5

GEOFYSICS

BRITSKY Oleksander, SHCHERBYNA Serhii, PIGULEVSKIY Petro, LISOVYI Yurii, CHEREVKO Iryna

A new laser approach for seismic risk assessment10

SKAKALSKA Ludmyla, NAZAREVICH Andriy, KOSARCHYN Volodymyr

Estimates of fracture and permeability of rocks in well sections according to the predicting method19

BEZRODNA Iryna, BEZRODNY Dmytro

Analysis of magnetic anisotropy of rock samples from the polygon of the Krivorizka extremely deep well.....26

TLEUBERGENOVA Aigerim, UMIROVA Gulzada, MAUSSYMBAYEVA Aliya, PORTNOV Vasiliy

Comprehensive analysis of magnetic and gravity data based on volumetric gravity-magnetic modeling along
the Geotraverse in the Shu-Sarysu Sedimentary Basin.....31

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

MANSUROV Mamoy

Geochemical characteristics of the main ore components in the Goshgarchay porphyry-epithermal system
(Lesser Caucasus, Azerbaijan).....39

MINERAL RESOURCES

MYKHAILOV Volodymyr, YESSENDOSSOVA Ainel

Comparative characteristics of the geological structure and lead-zinc mineralization
of the Uspensky (Central Kazakhstan) and Beregovsky (Transcarpathian) ore regions46

LYTVYNYUK Stanislav, KURYLO Mariia, VIRSHILO Ivan, BRATAKH Mykhailo

Basic classification systems features as a tool for management and investment analysis of subsoil use projects.....61

OKHOLINA Tetiana, KUZMANENKO Halyna

Comparative geological and economic assessment of the titanium deposits of Ukraine using the example
of the Novomyrhorod placers district69

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

YEMELIANOV Volodymyr, NASIEDKIN Yevhen, FEDOSEIENKOV Serhii, KOSHLIAKOVA Tetiana

Application of hydroacoustic methods in geochemical research of pollutants distribution
in the surface layer of bottom sediments74

GEOINFORMATICS

VYZHVA Zoya, DEMIDOV Vsevolod, VYZHVA Andrii

The statistical simulation of random fields with the Gaussian type correlation function
by the investigation of the magnetometry data81

STARODUB Yuriy, HAVRYS Andrii, KOZIONOVA Olesia

Study of the stress-deformed state of soils of loaded engineering objects88

AZIMOV Oleksandr, ROGOZHIN Olecsij, TROFYMCHUK Oleksandr

A conceptual approach to the creation of an information support system for the works related to the management
of the geological environment in the context of the localization of municipal solid waste94

Володимир БАРАНОВ, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: andreevich7526@i.ua

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

Яна АНТИПОВИЧ, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: yana_antipovich@ukr.net

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

Сергій СТЕФАНКО, мол. наук. співроб.

e-mail: arkinstone7@gmail.com

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, Дніпро, Україна

ФРИКЦІЙНІ ЯВИЩА У ВУГІЛЬНИХ ШАХТАХ: ПРИЧИНИ, НАСЛІДКИ ТА ВПЛИВ НА ГАЗОДИНАМІЧНІ ЯВИЩА

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

Вугільні шахти є об'єктами підвищеної небезпеки, оскільки в них відбуваються динамічні, газодинамічні та термічні явища. Ці явища призводять до порушень робочого режиму, виведення з ладу гірничого обладнання, загибелі гірників, збільшення витрат на видобуток вугілля та інших наслідків. Мета статті – викласти результати досліджень умов утворення термічних ефектів у вугільних шахтах та причин їх появи, що має як наукову, так і прикладну актуальність. Проведені дослідження дали зрозуміти, що іскріння може виникати під дією як техногенних, так і природних чинників. Фрикційні явища, що призводять до термодинамічних ефектів, зафіксовані в багатьох шахтах і країнах світу. Основна частина вибухів і спалахів метану відбувається при фрикційному іскрінні порід, що містять сульфід, тому що останні продукують іскри досить високої температури, здатної призводити до займання горючих газів, а також виділення сірководню, що має малу температуру займання. У світовій практиці описано випадки займання горючих матеріалів під час посадки покрівлі за відсутності вугілля. Англійські дослідники зробили висновок, що суміш метан-повітря може спалахувати від іскри, що утворюється під час тертя пісковика об пісковик або аргіліту о пісковик. За літературними даними, займання горючих матеріалів у вугілля може відбуватися: внаслідок викидів та вибухів, ініційованих обваленням порід при посадці; коли іскровий розряд виникає у кварці при трибо- або п'єзоєфекті; через присутність піриту у вугіллі або породах; при піроефекті; у разі виникнення електрестатичності вугілля. На мікрорівні у кварцових зернах пісковиків встановлено утворення статичних зарядів дислокаціями, які декоруються пилом. Особливо сильний ефект може виникати за наявності в повітрі крім метану монооксиду вуглецю, водню, сірководню та ацетилену. Встановлено збільшення іскріння при фрикційному терті кварцу у присутності вугільного пилу. Наявність газових включень у пісковикі у разі зсувених деформацій призводить до появи додаткових концентрацій вуглеводнів. Унаслідок контакту такої суміші з розігрітою областю виникає короточасний малий спалах, що і є іскрою.

Ключові слова: іскроутворення, вугілля, пісковики, спалах, статичний заряд, порушення порід.

Постановка проблеми та мета дослідження.

Робота у вугільних шахтах завжди пов'язана із підвищеною небезпекою. Повсюдно, у різних країнах на шахтах відбуваються динамічні, газодинамічні та термічні явища, на ліквідацію наслідків яких витрачаються значні кошти. Мета даної роботи полягає в тому, щоб визначити умови та причини іскроутворення та подальшого самозаймання горючих матеріалів за відсутності прямого техногенного втручання. Актуальними є пошук закономірностей і з'ясування природи іскроутворення для подальшого підвищення безпеки робіт у вугільних шахтах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Виникнення іскор у шахтних умовах гірничих підприємств може відбуватися з різних причин, але всі вони поділяються на дві категорії: природні і техногенні. Техногенна дія на породу при розробці вугільних родовищ часто призводить до різномірних термічних ефектів. Під час роботи прохідницького чи очисного комбайна виникає фрикційне іскріння (Ботвенко 2012). Фрикційні явища, що призводять до термодинамічних ефектів, зафіксовані в багатьох шахтах по всьому світу. Наприклад, лише в одній Німеччині за 20 років з 1965 по 1985 р. сталося 426 вибухів, з яких 111 випадків виникли через фрикційне тертя (Jonsson et al., 1998).

За даними (Забурдяев, 2005), основна частина вибухів метану та загоряння відбувається під час фрикційного іскріння порід, що містять сульфід. Це відбувається тому, що пірит здатний окислюватися і його частинки спалахують у повітрі. За певних умов сульфід і здатні виділяти сірководень та пилоподібну сірку, які

мають малу температуру самозаймання. Зважений у повітрі пил сірки пожежонебезпечний. Нижня концентраційна межа займання – 17 г/м³; температура самозаймання – 190° С. Згенерований рідкою сіркою сірководень вибухає при об'ємній концентрації від 4,3 до 45 %; температура самозаймання – 260° С (Анциферов и др., 2004). Іскри, що виникають, здатні ініціювати вибух газоповітряної суміші, що містить достатню концентрацію сірководню, монооксиду вуглецю та метану. У такому разі займання метану відбувається миттєво (Цокельверг, 1931). Крім цього, велике значення має й тиск газу – температура займання метану знижується пропорційно до збільшення тиску.

Епізодичні зрушення в породах. У світовій практиці було описано випадки займання горючих матеріалів під час посадки покрівлі за відсутності вугілля. Найпершим документально зафіксованим випадком є вибух, що стався 8 листопада 1896 р в Англії на руднику "Маїнді Піт". Після цього подібні випадки реєструвалися і на інших шахтах. У зв'язку із цим у 1913 р англійці Стірлінг і Кадман провели експерименти зі зразками пісковика, доставленими з копальні "Беллеву", у якому раніше було зафіксовано подібний випадок займання. У кожному експерименті під час тертя породи об породу вдавалося доводити спалах суміші метану з повітрям різної концентрації. За отриманими даними було зроблено висновок, що суміш метан-повітря може спалахувати від іскри, що утворюється під час тертя пісковика об пісковик або аргіліту об пісковик (Цокельверг, 1931).

Окрім цього, відомі випадки винятково геологічного (природного) впливу на виникнення пожеж. Особливий тип рухів, що залежить від властивостей осадових гірських порід, був раніше виділений А. Кізлінгером і названий метатектонічним порушенням (Николаев, 1988). Порушення проявляються в поверхневих переміщеннях окремих блоків корінних порід, зумовлених зануреннями і підняттями, що відбуваються в даний час. Внаслідок цього з'являються відкриті тріщини, геологічні порушення, кліваж. Деформації відбуваються зі швидкістю 1–2 мм на рік і можуть провокувати обвалення порід у гірничі виробки, що призводять до спалахів.

На сьогодні відомі та описані причини періодичних тектонічних деформацій в осадових відкладах Донбасу. Тому загорання горючих матеріалів та вугілля може відбуватися: внаслідок викидів і вибухів, ініційованих обваленням порід при посадці; коли іскровий розряд виникає у кварці при трибо-або п'єзоефекті; через присутність піриту у вугіллі або породах; при піроефекті; у разі виникнення електрестатичних зарядів вугілля (Баранов, 2000; Булат и др., 1989).

Електричні явища у породах. Окрім метатектонічних порушень, виділених на макорівні, існують і мікропорушення у мінералах, описані у 50–60-х рр. минулого століття А. Коттрелом (1969), Н. Л. Картером та ін. (1964). Мається на увазі дислокаційна теорія трансформації міцності речовини, розроблена вченими після винаходу В. К. Зворикіним електронного мікроскопа на початку 40-х рр. минулого століття.

У 80-х рр. минулого століття (Баранов, 2000) за допомогою електронного мікроскопа типу ЕОМ-100Л, що просвічує, були досліджені свіжі сколи кварцу з пісковиків вугільної шахти. Там були встановлені системи площин ковзання, з якими пов'язане утворення статичної електрики. На рис. 1 представлено фотографію сколу кварцового зерна із пластичними деформаціями, до яких "прилипили" частинки пилу. Представлені смуги ковзання сформувалися у процесі тектонічних деформацій і є, власне, мікротрещинами. Утворення статичних зарядів зазначеними деформаціями декорується пилом, який притягується саме до зон концентрації таких зарядів.

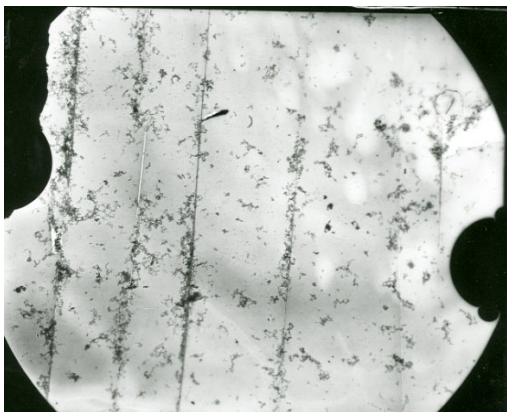


Рис. 1. Смуги ковзання в зерні кварцу з пісковиків вугільної шахти, що декоруються пилом (Баранов, 2000)

Загалом електричні явища у породах відомі давно й описані в Гірській енциклопедії (Горная энциклопедия, 1989). До таких належать п'єзоелектричні властивості гірських порід (п'єзотиски) – здатність кристалічних речовин створювати електричну поляризацію під час стискання або розтягування їх у певних напрямках. Залежно від властивостей мінералів і порід можуть накопичуватися як позитивні, так і негативні заряди. Останні можуть

реалізовуватися у вигляді електричних розрядів. Прикладом є трибоелектрика, властиве деяким породам і мінералам – явище виникнення електричних зарядів під час тертя. Крім того, у гірських породах можуть існувати такі явища, як електроліз, піроелектрика тощо, які можуть призводити до накопичення достатніх електростатичних зарядів і подальшого виникнення електричних розрядів у вигляді іскріння.

Велику роль у появі термічних ефектів може відігравати статична електризація. За даними (Забурдяев, 2005), це явище може бути причиною вибухів або спалахів газових сумішей, що містяться в привибійній частині. Автор (Леб, 1963) зазначає, що статична електризація охоплює всі процеси, що ведуть до утворення та поділу позитивних і негативних електричних зарядів у результаті механічної деформації (у даному випадку внаслідок диспергування води та руйнування вугільного масиву). У разі диспергування твердих частинок вугілля або рідин суміші таких заряджених частинок з повітрям зазвичай вибухонебезпечні. Електричний заряд унаслідок механічної деформації легше виникає у присутності крапель води, ніж у присутності вугільного пилу.

Експериментальні дослідження. Відбір проб. Для детального дослідження іскроутворення в гірських породах на кількох шахтах Донбасу було відібрано різні зразки порід (пісковики, вапняк, аргіліт, тонштейн). Зразки мали різні форми: кілька пісковиків відібрано з керна пробурених підземних свердловин; аргілітовий kern з іншої шахти, розділений по площині нашарування на пластини до декількох десятків міліметрів завтовшки; решта мали форму штуфів. Kern пісковиків з підземних свердловин був відібраний у шахті, де зафіксовано випадок самозаймання горючих матеріалів на відпрацьованій ділянці. З отриманих проб виготовлено шліфи, проведено комплекс експериментів, результати яких викладено нижче. Частина результатів раніше була опублікована в роботі (Баранов и др., 2019). Проте з'явилися нові дані, отримані завдяки проведенню додаткових експериментів, які представлені в цій статті.

Експеримент із генерації електрики. Першу серію лабораторних досліджень було проведено у спробі отримати як якісні, так і кількісні характеристики величини статичної електрики з наявних проб пісковиків. Мета експерименту полягала в тому, щоб визначити можливість виникнення та величини статичного заряду в породах. Об'єктом дослідження були диски пісковиків різної структури, вирізані з керна. Диски зазнавали зовнішніх динамічних впливів, що призвело до виникнення у структурі зсувних деформацій. Завдяки застосуванню спеціальних чутливих геологічних методів поблизу поверхні зразків було зафіксовано наявність слабого статичного заряду. Однак даним методом неможливо визначити величину заряду в цифровому вираженні, лише наявність або відсутність статичного заряду.

У процесі проведення експерименту для досягнення кількісних результатів була спроба використовувати цифровий вимірювальний прилад (CM80DIGITAL CLAMP METER), завдяки якому можна фіксувати електромагнітні хвилі, визначати потужність, силу струму, величину напруги, у тому числі статичної електрики. Однак у цьому разі його чутливість була недостатньо високою, щоб виконати кількісні виміри. Отже, для визначення величини статистичного заряду в гірських породах потрібні досить точні дослідження із застосуванням чутливих приладів.

Експерименти з фрикційного іскріння. Наступна серія експериментів спрямована на отримання іскор

унаслідок фрикційного тертя. Об'єктом послужили кілька зразків чотирьох типів гірських порід вугільних родовищ. Між зразками створювалося тертя як із нанесенням вугільного пилу на поверхню, так і без нього. Вугільний пил дає змогу відтворити фрикційні процеси, більш

наближені до шахтних умов. Також було виконано петрографічні дослідження деяких пісковиків для з'ясування особливостей мінералогічного складу. Результати фрикційного тертя представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження іскріння внаслідок зсувних деформацій пісковиків

Найменування зразків	Іскріння	Інтенсивність іскріння
Пісковик дрібнозернистий ($d_c = 0,13-0,18$ мм) ш. Покровська d_4Sd_5	Присутня	Дуже слабка
Пісковик дрібнозернистий покритий вугільним пилом ш. Покровська d_4Sd_5	Присутня	Слабка
Пісковик дрібнозернистий ш. Котляревська l_1Sl_2	Не виявлено	–
Пісковик дрібнозернистий, покритий вугільним пилом ш. Котляревська l_1Sl_2	Не виявлено	–
Пісковик крупнозернистий ш. Покровська d_4Sd_5	Присутня	Вища за середню
Пісковик крупнозернистий, покритий вугільним пилом ш. Покровська d_4Sd_5	Присутня	Сильна
Тонштейн	Не виявлено	–
Тонштейн, покритий вугільним пилом	Не виявлено	–
Вапняк ш. Центральна l_6Ll_7	Не виявлено	–
Вапняк, покритий вугільним пилом ш. Центральна l_6Ll_7	Не виявлено	–
Аргіліт	Не виявлено	–
Аргіліт, покритий вугільним пилом	Не виявлено	–

Дослідження показали, що внаслідок зсувних деформацій деякі пісковики здатні генерувати іскри. Цей ефект вдалося відобразити на рис. 2. Знімок зроблено у темряві, для кращої демонстрації ефекту іскріння. Неважко припустити, що підвищення площі фрикційної поверхні неминуче збільшуватиме потужність іскріння. За попередніми розрахунками потужність такого іскріння в реальних умовах, у площині середнього порушення умов шахти, буде на кілька порядків сильнішою. Також за результатами простежується закономірність – інтенсивність іскроутворення залежить від крупності уламкових зерен. Експерименти із застосуванням вугільного пилу дозволили зробити такий висновок: вугільний пил може бути каталізатором частоти появи та інтенсивності іскріння, але лише для порід, яким і без того властиве іскроутворення.



Рис. 2. Іскріння кварцових пісковикових штуфів у процесі зсувної деформації

Під час петрографічного дослідження було відзначено наявність прошарків у пісковиках із суттєвим вмістом уламкового кварцу $>70\%$. Разом з уламками порід, польовими шпатами обсяг жорсткого скелета таких прошарків сягає 90% . У результаті зіставлення отриманих експериментів із даними петрографічного аналізу встановлено, що виникнення іскор залежить від вмісту кварцу досліджуваних порід. Чим більше у складі і більші за розміром кварцові зерна у породі, тим жорсткіший скелет і сильніше виявляється даний ефект. Зменшення вмісту кварцу в породі та зменшення розмірів уламкових зерен і збільшення вмісту цементу пісковиків призводить до

зменшення інтенсивності іскріння. Прошарки крупнозернистого кварцового пісковика можуть займати незначні обсяги за мірками шахти та провокувати явища іскріння, а отже, й інші негативні процеси у відпрацьованих гірничих виробках.

Інтерпретація отриманих результатів. Як раніше згадувалося – у шахтних умовах іскри можуть виникати в умовах сильного тертя деяких включень, зокрема піриту. Але як показав петрографічний аналіз, у структурі досліджуваного пісковика даних включень піриту не виявлено. Однак деякі зразки мають сильний ефект іскріння. Причини можуть бути різні: особливість мікровключень або люмінесценція кварцу. Проте одним з пояснень цього може бути раніше досліджена закрита зернова пористість пісковиків (Баранов, 2000).

Закрита пористість пісковиків здебільшого практично не розглядається, оскільки вважається, що цей параметр порід не становить вагомого інтересу з погляду видобутку газу або вирішення проблем викидонебезпеки. Однак щодо проблем термічних і газодинамічних явищ на шахтах слід приділяти особливу увагу дослідженню цього фактору.

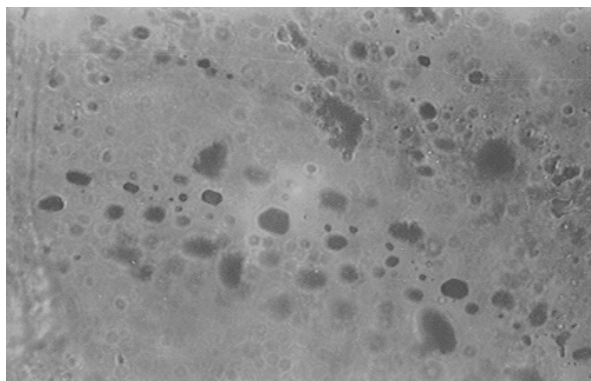
Загальновідомий спосіб визначення закритої пористості розрахунковим методом, як різниці між загальною і відкритою пористістю, дає змогу отримати значення переважно того обсягу закритих пор, який міститься в цементі породи. Наприклад, для пісковиків Донбасу цей показник зазвичай не перевищує $1-3\%$ (Забигайло і др., 1983). Дослідження газонесних пісковиків Донецького басейну на мікрорівні за допомогою оптичного мікроскопа дозволило умовно виділити окремий тип закритої пористості – зерновий. Такий тип раніше ніколи не враховували. Відомо, що закриту зернову пористість створюють різні типи газових включень у кварцових зернах пісковиків. Вони представлені у вигляді закритих мікропор та тріщин під тиском до 50 МПа (Baranov and Antipovich, 2018). Газ у включеннях перебуває під великим тиском в ізолюваних порах або у вигляді смужок Бьоме, подальша трансформація яких утворює так звану губчасту структуру (Баранов, 2000). За складом газові включення представлені переважно метаном, з

домішками вуглекислого газу, азоту, ацетилену та інших (Баранов, 2000; Наумов і Наумов, 1980).

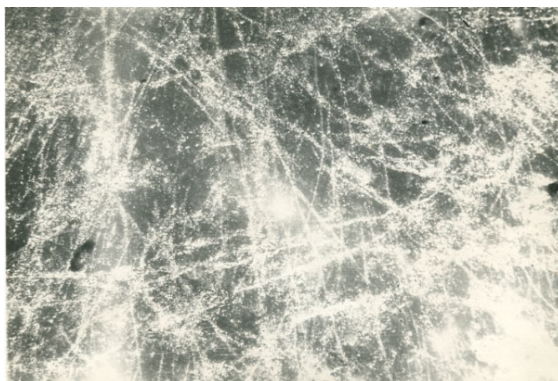
Пісковик як основний колектор накопичує газ у відкритих порах, але у разі підвищення тиску на породу частина газу мігрує в мікродоформації кварцових зерен, що формуються за певних напруг, які після заліковування утворюють зернову закриту пористість. Можливий зворотний процес, коли під час тектонічного розвантаження частина газу мігруватиме з мікродоформацій уламкових зерен порід у міжзерновий простір породи. Враховуючи, що обсяг газових включень у кварці може

сягати 4–10 см³ на 100 г кварцу (Якшин, 1975) та додатковий тиск гірського масиву, у якому розташований пісковик, газові включення можуть становити додатковий імпульс газодинамічних проявів (рис. 3).

Обсяги закритої пористості, які можна отримати за допомогою запропонованої методики, є абсолютними. Дослідження під оптичним мікроскопом зі збільшенням 1200 крат з імерсією дають змогу побачити включення з мінімальним розміром 0,1 мкм. Якщо проводити дослідження під ще більшим збільшенням, на нашу думку, можливо встановити і менший розмір включень.



зб. 1200^x з імерсією



зб. 100^x

Рис. 3. Газові включення в зернах кварцу пісковиків Донбасу (Баранов, 2000; Баранов і др., 2019)

Присутність газових включень у зернах пісковика під час зсувних деформацій призводить до появи внутрішньої напруги в мінералі, що провокує природну декрепітацію газових включень (Реддер, 1987). Більше того, тертя руйнує частину мінералів у площі зіткнення. Усе це разом призводить до вивільнення газових включень. Такий процес різко збільшує концентрацію метану на ділянці зіткнення. У результаті контакту такої суміші з розігрітою областю виникає короточасний малий спалах, що і є іскрою. Підтвердженням цього є й залежність між інтенсивністю іскріння та кількістю вмісту кварцу, адже у пісковиках більшою мірою кварц є основним носієм описаних газових включень.

Висновки

На сьогодні відомо, що причинами виникнення іскріння під час відпрацювання вугільних пластів можуть бути різні фактори, головним з яких є удар або тертя гірських порід, або фрикційне тертя металу о жорстку структуру породи. Без прямого техногенного втручання вагомими факторами стають такі, як: різкі зрушення пісковика під час посадки покрівлі, що призводять до їх тертя, або статична електрика, накопичена у кварці. Проведені експерименти показали, що такі явища у гірських породах за певних умов можуть виникати. Особливо небезпечні вони в шахтних умовах – де часто присутній осілий або у вигляді суспензії в повітрі вугільний пил, комплекс різних горючих газів, як у шахтній атмосфері, так і у структурі пісковика, плюс гірський тиск. Як горючі гази можуть виступати сірководень, ацетилен і метан. Перші два мають досить низьку температуру загорання, тому іскри, що з'явилися, здатні ініціювати загорання вуглеводнів, залишків вугілля, деревного опорного матеріалу та інших паливно-мастильних матеріалів у гірничих виробках. Якщо цей процес реалізується протягом десятків годин, відрізати його від самозаймання складно. Такі явища можуть виявлятися у вугільних шахтах та й інших гірничих підприємствах.

Список використаних джерел

- Анциферов, А.В., Тиркель, М.Г., Хохлов, М.Т. і др. (2004). Газоносность угольных месторождений Донбасса. Наукова думка.
- Баранов, В.А., Стефанко, С.В., Головки, А.М. (2019). Термические эффекты в угольных шахтах. *Сборник научных трудов*. ІГН НАНУ, 93–97.
- Баранов, В.А. (2000). Структурні перетворення пісковиків Донбасу і прогноз їх викидонебезпечності. *Автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.16*. Дніпропетровськ.
- Ботвенко, Д.В. (2012). Проблема фрикционного воспламенения метановоздушной смеси в современных условиях. *Научно-технический журнал "Вестник"*, 2, 48–50.
- Булат, А.Ф., Яценко, И.А., Баранов, В.А. (2017). Влияние условий формирования угольных месторождений и горно-геологических условий на безопасность работ в шахтах. *Уголь Украины*, 11–12, 30–38.
- Горная энциклопедия. (1989). Т. 4. Советская энциклопедия.
- Забигайло, В.Е., Лукинов, В.В., Широков, А.З. (1983). Выбросоопасность горных пород Донбасса. Киев: Наукова думка.
- Забурдяев, Г.С. (2005). Фрикционное искрение как источник воспламенения метана и способы его предотвращения. *Сборник научных трудов*. Наука, 206–213.
- Леб, Л. (1963). Статическая электризация. Государственное энергетическое издательство.
- Наумов, Г.Б., Наумов, В.Б. (1980). Включения в минералах как источник информации в изучении геологических процессов. *Сборник научных трудов*. Наука, 178–195.
- Николаев, Н.И. (1988). Новейшая тектоника и геодинамика литосферы. Недра.
- Реддер, Э. (1987). Флюидные включения в минералах. Т. 1. Природа включений и методы их исследований. Мир.
- Цокельверг, Н.Г. (1931). Результаты опытных исследований за границей в области изучения воспламенения гремучего газа от трения. *Уголь*, 71–72.
- Якшин, В.И. (1975). Гранулированный кварц – новый вид минерального сырья. *Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук: 04.00.15*. Свердловск.
- Baranov, V.A., Antipovich, Ya.V. (2018). The results of the research of sandstones closed porosity. *Journal of Geology*, 27(3), 414–421.
- Jonsson, L., Lohdi, J., Rentsch-Jonas, M., Simonsson, B. (1998). In: International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosion. Eighth International Colloquium on Dust Explosions. Illinois, 171–174.

References

- Antsiferov, A.V., Tirkel, M.G., Khokhlov, M.T. et al. (2004). Gas content of Donbas coal deposits. *Naukova dumka* [In Russian].
- Baranov, V.A. (2000). Structural transformations of Donbas sandstones and the forecast of their release hazard. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.): 04.00.16*. Dnipropetrovsk [In Ukraine].
- Baranov, V.A., Antipovich, Ya.V. (2018). The results of the research of sandstones closed porosity. *Journal of Geology*, 27(3), 414–421 [In Russian].

Baranov, V.A., Stefanko, S.V., Golovko, A.M. (2019). Thermal effects in coal mines. *Collection of scientific papers*. IGN NASU, 93–97 [In Russian].

Botvenko, D.V. (2012). The problem of frictional ignition of methane-air mixture in modern conditions. *Scientific and technical journal "Bulletin"*, 2, 48–50 [In Russian].

Bulat, A.F., Yashchenko, I.A., Baranov, V.A. (2017). Influence of the formation conditions of coal deposits and mining and geological conditions on the safety of work in mines. *Coal of Ukraine*, 11–12, 30–38 [In Russian].

Jonsson, L., Lohdi, J., Rentsch-Jonas, M., Simonsson, B. (1998). In: International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosion. Eighth International Colloquium on Dust Explosions. Illinois, 171–174.

Loeb, L. (1963). Static electrification. State Energy Publishing House [In Russian].

Mountain Encyclopedia. (1989). V. 4. Soviet encyclopedia [In Russian].

Naumov, G.B., Naumov, V.B. (1980). Inclusions in minerals as a source of information in the study of geological processes. *Collection of scientific papers*. Nauka, 178–195 [In Russian].

Nikolaev, N.I. (1988). Recent tectonics and geodynamics of the lithosphere. *Nedra* [In Russian].

Roedder, E. (1987). Fluid inclusions in minerals. V.1. Nature of inclusions and methods of their research. *Mir* [In Russian].

Tsokelverg, N.G. (1931). The results of experimental research abroad in the field of ignition of explosive gas from friction. *Coal*, 71–72 [In Russian].

Yakshin, V.I. (1975). Granulated quartz is a new type of mineral raw material. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.-Min.)*: 04.00.15. Sverdlovsk [In Russian].

Zabigailo, V.E., Lukinov, V.V., Shirokov, A.Z. (1983). Outburst hazard of Donbass rocks. *Naukova dumka* [In Russian].

Zaburdyayev, G.S. (2005). Frictional sparking as a source of ignition of methane and ways to prevent it. *Collection of scientific papers*. Nauka, 206–213 [In Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 24.03.23
Прорецензовано / Revised: 16.05.23
Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Volodimir BARANOV, DSc (Geol.), Senior Researcher

e-mail: andreevich7526@i.ua

Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Yana ANTIPOVICH, PhD (Geol.), Senior Researcher

e-mail: yana_antipovich@ukr.net

Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Serhii STEFANKO, Junior Researcher

e-mail: arkinstone7@gmail.com

Institute of Geotechnical Mechanics named after M. S. Polyakov under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

FRICITIONAL PHENOMENA IN COAL MINES: REASONS, CONSEQUENCES AND INFLUENCE ON GAS DYNAMIC AND THERMAL PHENOMENA

Coal mines are objects of increased danger, since dynamic, gas-dynamic and thermal phenomena occur in them. These phenomena lead to violations of the operating regime, the failure of mining equipment, the death of miners, an increase in the cost of coal mining and other consequences. The purpose of the article is to present the results of studies of the conditions for the formation of thermal effects in coal mines and the reasons for their occurrence, which has both scientific and applied relevance. The conducted studies made it clear that sparking can occur under the influence of both man-made and natural factors. Friction phenomena leading to thermodynamic effects have been recorded in many mines and countries of the world. The main part of explosions and fires of methane occurs during frictional sparking of rocks containing sulfides. The latter produce sparks of a sufficiently high temperature, which can lead to the ignition of combustible gases, as well as the release of hydrogen sulfide, which has a low ignition temperature. In world practice, cases of ignition of combustible materials during the landing of the roof in the absence of coal have been described. British researchers concluded that the methane-air mixture can be ignited by a spark generated by the friction of sandstone against sandstone or mudstone against sandstone. According to the literature data, the ignition of combustible materials and coals can occur as a result of: emissions and explosions, rock collapse during landing, when a spark discharge occurs in quartz during a tribo- or piezoelectric effect; the presence of sulfides in coals or rocks, pyroelectric effect; electrification of coals. At the micro level, in quartz grains of sandstones, the formation of static charges by dislocations, which are decorated with dust, has been established. A particularly strong effect can occur if, in addition to methane, carbon monoxide, hydrogen, hydrogen sulfide, and acetylene are present in the air. An increase in sparking during frictional friction of quartz in the presence of coal dust has been established. The presence of gas inclusions in sandstone minerals during shear deformations leads to the appearance of additional concentrations of hydrocarbons. As a result of contact of such a mixture with a heated area, a short-term small flash occurs, which is a spark.

Key words: sparking, coals, sandstones, fire, static charge, rock disturbances.

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

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

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.34

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.02>

Oleksander BRITSKY¹, PhD (Phys. & Math.)

ORCID ID: 0000-0003-1081-7543

e-mail: britsky_ai@ukr.net

Serhii SHCHERBYNA², PhD (Phys. & Math.)

e-mail: nohup@ukr.net

Petro PIGULEVSKIY², DSc (Geol.)

ORCID ID: 0000-0001-6163-4486

e-mail: pigulev@ua.fm

Yurii LISOVYI², Junior Researcher

ORCID ID: 000-0001-6145-9251

e-mail: lisovyi@ukr.net

Iryna CHEREVKO³, PhD (Social.)

ORCID ID: 0000-0001-7083-6119

e-mail: ira071165@yahoo.com

¹Institute for Information Recording of NASU, Kyiv, Ukraine

²Institute of Geophysics of NASU, Kyiv, Ukraine

³National Kyiv-Pechersk Historical and Cultural Reserve, Kyiv, Ukraine

A NEW LASER APPROACH FOR SEISMIC RISK ASSESSMENT

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

In Europe, many countries have territories with the seismotectonic active areas – Italy, Greece, Romania etc. As we know, the special government and commercial organizations made many attempts to solve the seismic risk assessment problems in these countries using many different devices for solving these problems by estimating the seismic risk. All popular in all European countries specific devices are divided into two basic groups for solving the seismic risk assessment – accelerometers and velocimeters. For solving scientifically important tasks of the seismic risk assessment, there are no other high sensitivity devices for measurement of the displacements in countries with high level of the seismicity.

These problems are based on difficulty for business to produce effective devices for measuring the displacement. These problems are based on influences of the temperature on mechanical and electronics instabilities of systems for measurement of the displacement. The cost of devices for measurement of the displacement with temperature stabilization may be higher than for devices of measurement of velocity or acceleration. Broadband seismometers with very high exactness of measurements of seismic events of any type can be afforded by the countries with high financial achievements only. However, there are other more important problems for measurements of the displacement beside acceleration or velocity for any places where there are seismic active zones.

Keywords: laser devices, seismicity, risk assessment, hazard areas, building, statistical estimation.

Background

For saving of any building in seismic dangerous areas in Europe the Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) was developed. It was launched in 1992 by the International Lithosphere Program (ILP) with the support of the International Council of Scientific Unions (ICSU), and

endorsed as a demonstration program in the framework of the United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction (UN/IDNDR) (United Nations International Decade ..., n.d.). Fig. 1 shows the map of the Global Seismic Hazard Assessment since 1992.

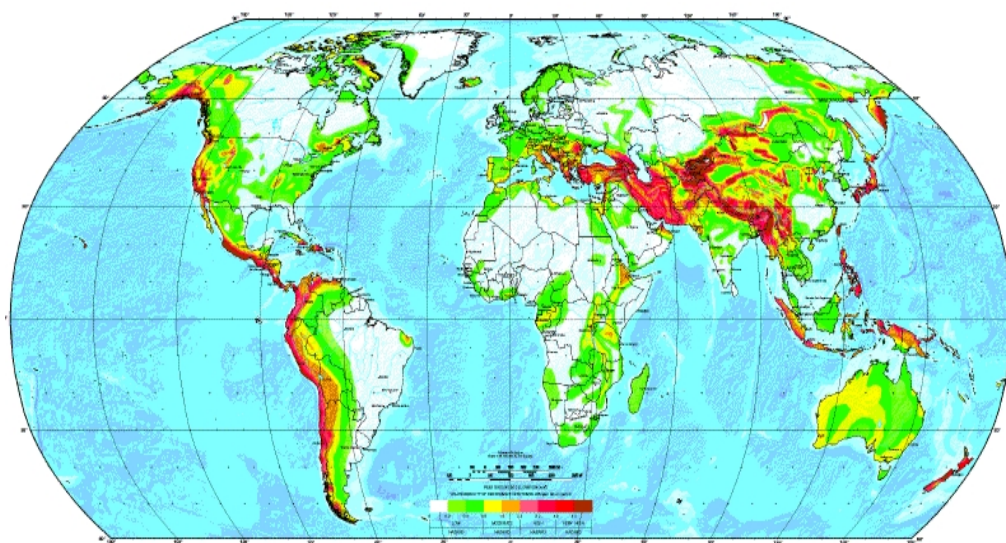


Fig. 1. Global seismic hazard map since 1992

© Britsky Oleksander, Shcherbyna Serhii, Pigulevskiy Petro, Lisoviy Yurii, Cherevko Iryna, 2023

This map was developed many years ago and the seismic intensity has significantly grown in all countries of Europe that are placed on seismotectonic active areas for the last five years. For example, fig. 2 shows a graph of seismic activity in Romania. All significant Romanian earthquakes with magnitude $M > 5.0$ happened within five years – from 2011 to 2015.

In the case of such growing seismic activity many new construction sites must be subjected to the processes of measurement of seismic waves and study of all properties of seismic intensity. For receiving of these significant results in Europe and other countries around it there are more popular devices as accelerometers and velocimeters

(The Effectiveness ..., n.d.). Only one calculated parameter as acceleration for estimations of all properties of seismic intensity is not enough for receiving all full results of seismic risk assessment. From physical point of view for estimating the properties of seismic hazard assessment for any building in dangerous seismic places there should be given three parameters as basic results – acceleration, velocity and displacement. For real evidence of significance of this difficult situation it is very important to remember dangerous event in China, where one high building was destroyed after dangerous technical preparatory works around it (<http://truthfrequencyradio.com> ...) fig. 3.

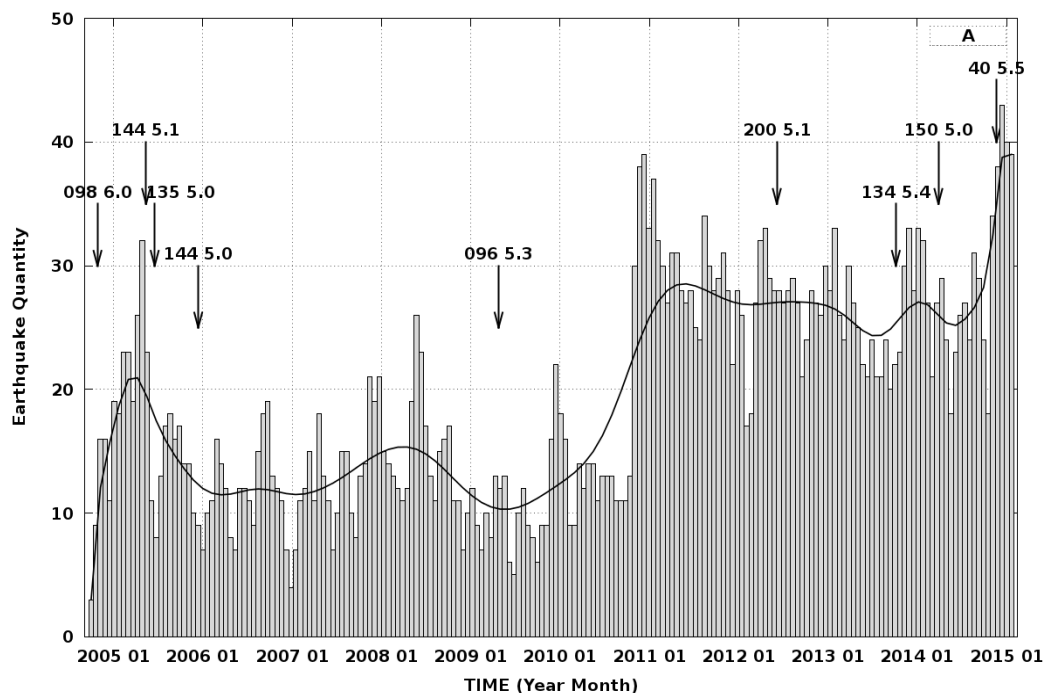


Fig. 2. The quantity of the earthquakes in Romania from 2005 to 2015 years

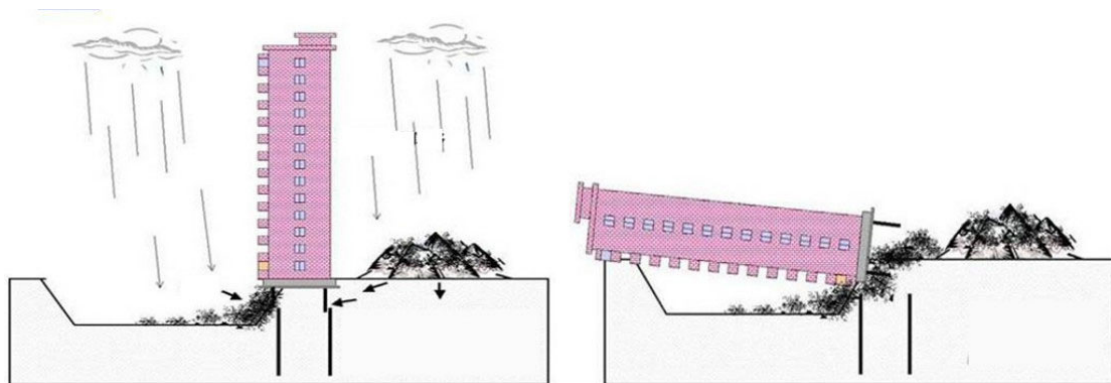


Fig. 3. Dangerous events with building in China with very low values of the frequency of their realization

In this case all the received values of accelerometers or velocimeters will be smaller by amplitude than amplitude of the displacement. It is the first problem with using of the acceleration or velocity only. Second problem is as results of numerical calculation velocity and displacement from acceleration (fig. 4). Fig. 4 shows a problem of the numerical computer calculation of the displacement from measured acceleration. As we see in fig. 4, the value of the displacement has 3000 millimeters as maximum and -1000 millimeters as minimum. Full amplitude of these calculated

displacements will be 4000 millimeters or 4 meters. The cause of this significant error is a problem with traditional numerical calculations of different sums that are used for displacement calculation. For removing these difficult problems it is more suitable to use special devices for real measurements of the real displacements.

The new digital vertical laser seismometer and its properties. For realization of compact system for measurement of the displacement on different floors of the "Kyiv-Pechersk Bell Tower" the Mikelson's laser interferometer

for measurement of the displacement was proposed to use. Note that the construction of laser interferometers may be different by approaches concerning the use of the mono-light optical systems for measurement of significantly limited displacements. Note that the design of the interferometer can be different. One of the options is shown in fig. 5. One from different variants is shown in fig. 5. In this proposed variant the principal scheme is

based on the special scheme for generation and analyzing of optical information. The scheme of laser information processing is fundamental. This is the subject of the invention and distinguishes the proposed interferometer from the analogue (Yerazunis, Brinkman, 2009). Exactly this system is an item of invention and it has significant difference from analogue (Yerazunis, Brinkman, 2009).

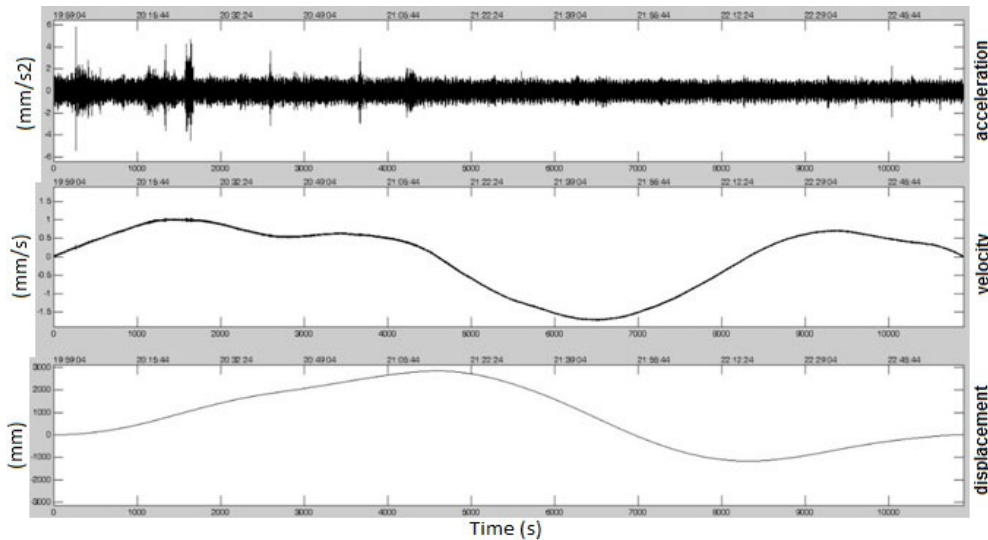


Fig. 4. Calculated velocity and displacement by real measured accelerations

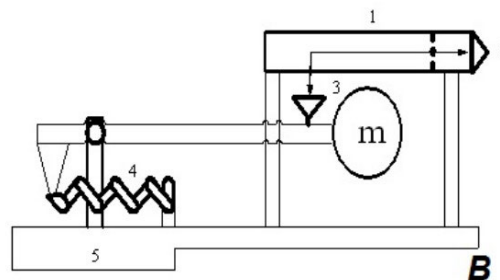


Fig. 5. Fragment of the equivalent mechanical circuit of the SL210 seismometer with built-in digital laser interferometer:

1 – body of the interferometer; 2, 3 – optical corner reflectors; 4 – pendulum suspension spring. A – SL210 seismometer; B – the lower part of the seismometer body, on which the main elements of its design are fixed (Britsky et al., 2015)

There is a variant of working with the main causes of displacement measurement errors by a compact semiconductor digital laser interferometer and ways to overcome them. It follows from the scheme of information processing of quadrature signals of the interferometer (fig. 5) that the relative displacement is defined as:

$$\Delta L_k = P * 2^B + X_k,$$

where: P – the number of segments $\lambda/2$ in the measured displacement; B – the bits depth of digitization of quadrature signals of the interferometer and elements of the correspondence matrix in fig. 5.

Thus, for example, at $B = 9$ the displacement in $\lambda/2$, regardless of the laser wavelength, is represented by the number 511. This means that in this case the real displacement will be represented as:

$$\Delta L_k = \frac{\Delta L_k}{511} \lambda/2,$$

where λ – is the length of the light wave in the space of the measurement.

Therefore, the main contribution to the measurement error of the relative displacement is made by the instability of the wavelength of the laser light in the measured space. The main reasons for this instability are as follows:

1. Influence of the temperature of a semiconductor laser on the wavelength of the light flux.

2. Influence of the parameters of the measurement medium on the wavelength of the light flux emitted by a semiconductor laser.

In addition, the relative displacement measurement error is affected by temperature changes in the dimensions of the measuring system structural elements.

Regarding the first factor, it can be argued that, firstly, the laser temperature must be kept within one mode, for example, in the proximity to one temperature $T = 20^\circ\text{C}$ (fig. 6). In this case, roughly, the wavelength of laser optic waves will be 636 nm.

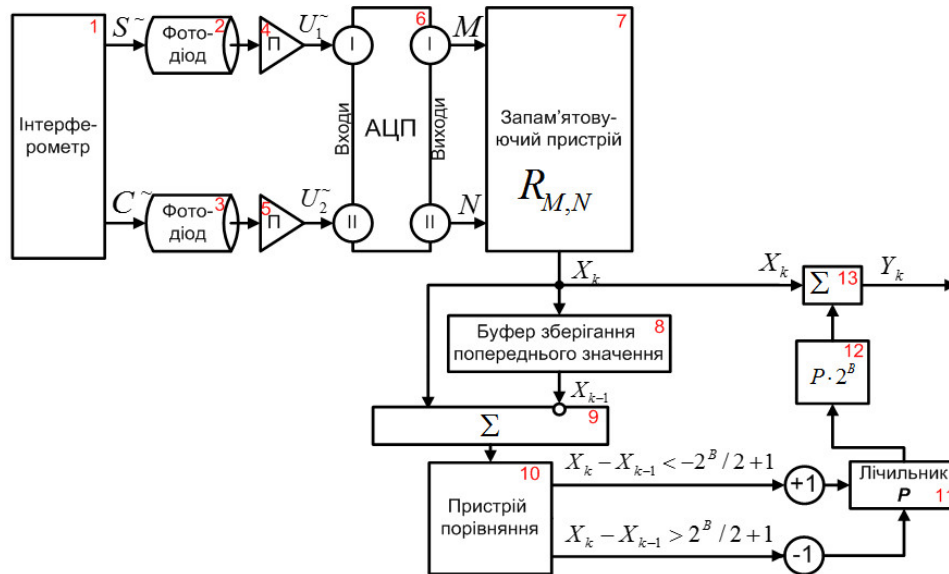


Fig. 6. Block diagram of information processing in a digital interferometer (Britsky et al., 2015)

However, within this mode, the relative instability of the generation frequency will have the next value:

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \alpha \Delta T,$$

where α – is the coefficient of linear thermal expansion of the laser crystal (Gorelik, Lebedev, 2013). With regard to GaAs, we obtain $0.573 \cdot 10^{-7}$ per 0.01°C , which indicates the need for even more accurate stabilization of the crystal temperature.

It is difficult to take into account temperature changes in seismometer structural elements, since they are made of different materials. It seems simpler to stabilize the temperature of the instrument case as a whole. At the same time, from the point of view of technical implementation, it is preferable to heat the instrument case to a stable temperature, above the ambient temperature, rather than cooling to a certain temperature. From fig. 6 it follows that the chosen laser has stable and wide modes at temperatures, for example, 34°C and 38°C . Naturally, the ambient temperature will be lower or it will be possible to shield the device from direct sunlight. As final form, from preliminary investigations of the properties of the laser seismometer the advantages and disadvantages of using digital laser interferometers in seismological instruments are noted. The advantages include the following:

1. Extended low-frequency measurement range down to almost 0 Hz. This allows vertical seismometers to be used as delta gravimeters.

2. It has been experimentally proven that horizontal seismometers can be used as tiltmeters with a resolution of 10^{-4} rad. sec.

3. Open software allows to use digital laser interferometers not only for measurements, but also for control in closed systems.

The disadvantages include the need for precise stabilization of the temperature of the semiconductor laser, which complicates the operational using of seismometers. At the same time, theoretical and experimental studies have confirmed the possibility of a significant increase in the accuracy of temperature stabilization of a semiconductor laser by increasing the order of astatism of the temperature stabilization system to the second.

The results of our research have shown that digital laser interferometers can be used not only for measurements, but

also when creating a broadband vibration platform for the purpose of metrological certification of geophysical instruments (fig. 7, 8).

The high accuracy of displacement measurement and open source software made it possible to create a broadband vibration platform for metrological certification of geophysical instruments. Fig. 7 has shown a fragment of the state metrological certification of the vibration platform itself using the linear measuring system ZL-80 (Renishaw), and fig. 8 shows an example of using a vibrating platform to obtain the frequency response of a vertical seismometer with a digital laser interferometer. The use of digital laser interferometers in seismometers made it possible to obtain new knowledge about geophysical processes in cultural and protected monuments of Ukraine.

The real displacement and calculated velocity and acceleration. "Kyiv-Pechersk Bell Tower" is a part of famous historic Orthodox Christian monastery what is registered in UNESCO (<https://en.wikipedia.org/> ...). Morphologically bell tower is located on the right bank of the Dnieper River outcrops within the plateau, which limited the valleys of the Dnieper and Lybid and cruciform ravine. The height of the plateau at the point of the bell tower is 190 meters above sea level. East of the bell tower in the direction of the Dnieper River plateau breaks almost directly.

"Kyiv-Pechersk Bell Tower" as a building object has an individual set of dynamic parameters with its own characteristics, which change, in consequence of the properties and effects of the environment (microseismic background). Methodical measurement microseismic background action in time for the controlled object using a laser seismometer is able to present a number of diagnostic parameters, namely natural frequencies and forms of fluctuations object spectral data values vibration displacement, vibration velocity and vibration acceleration of individual points of the object, logarithmic decrement of oscillations etc. It is based on the measured parameters obtained for effective and fairly rapid diagnosis of global technical condition of the object and its basic elements (fig. 9a, b). Fig. 9a, b have presented the original external appearance of bell tower and its architectural design.

For processing of measurement of the displacement it is very important to do the fixing of the temperature of environment for analyzing of the influences external

condition on behavior of laser devices. The values has presented in table 1 of the Celsius temperature by points of the measurements and values of altitude these areas in meters and arranged by time.

Fig. 10, 11 have presented the laser records of measured real displacement (top) and calculated from it velocity (middle) and acceleration (bottom) for different floors of the bell tower (0.00 meters and 12.56 meters, respectively).

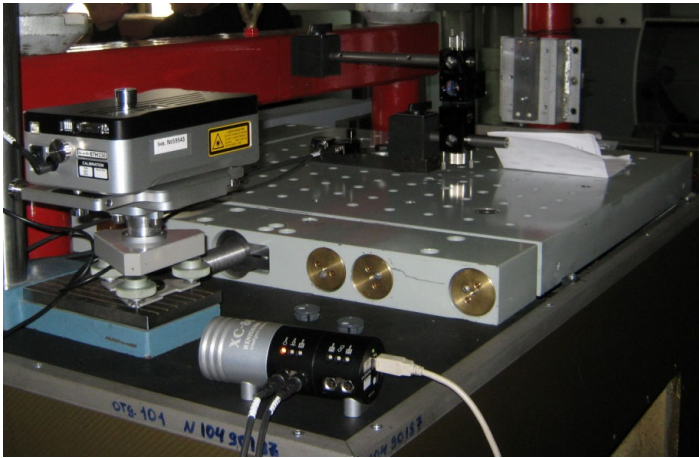


Fig. 7. General view of the main unit of the measuring system ZL-80

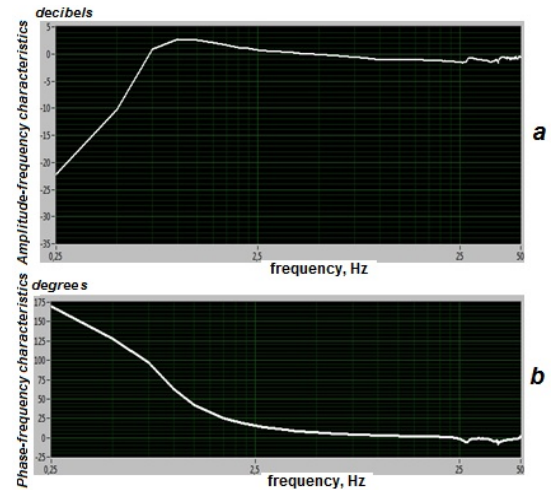


Fig. 8. Amplitude-frequency (a) and phase-frequency (b) characteristics of new vertical laser seismometer

The Celsius temperature by points of the measurements

N floor (fig. 9b)	Date GMT +0 (d-m-y h:m:s)	Altitude (m)	Temperature (C)
1	29-10-2015 08:42:16	+00.00	no data
2	29-10-2015 09:57:11	+11.50	16.81
3	29-10-2015 10:58:58	+30.80	16.68
4	29-10-2015 11:38:34	+33.60	18.06
1a	29-10-2015 13:02:55	-05.00	10.68

Table 1

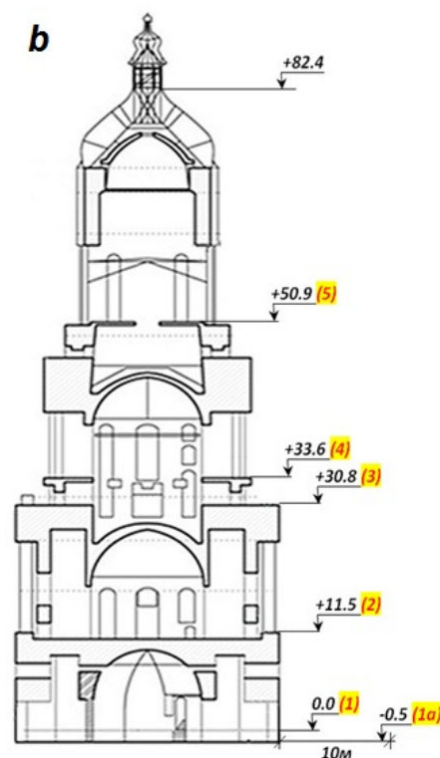
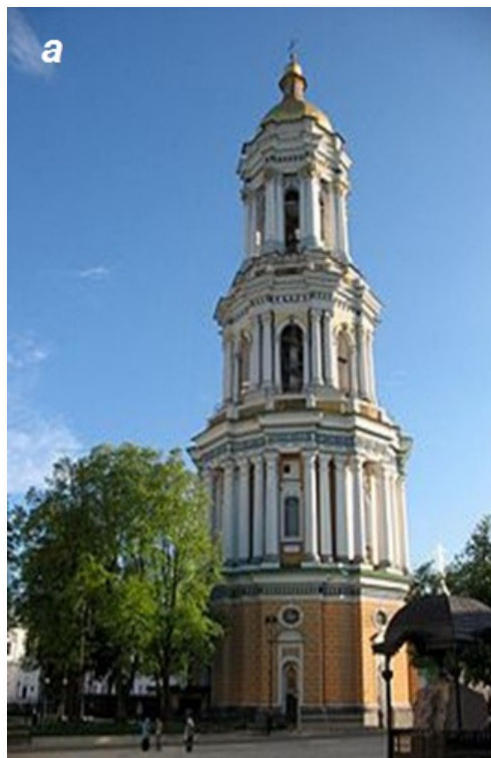


Fig. 9. The appearance (a) of the bell tower and its architecture construction (b)

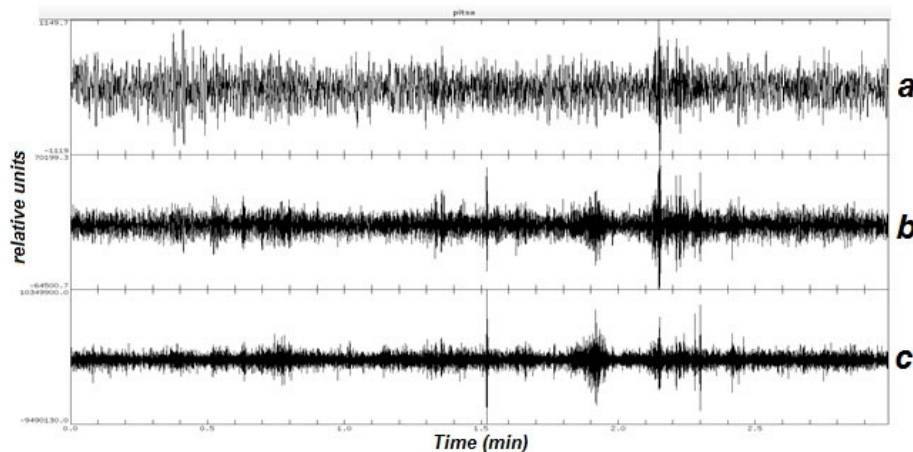


Fig. 10. The measured laser vertical displacement (a) and calculated from it velocity (b) and acceleration (c) in garden of the Lavra. The altitude of this point is equal 0.00 meters

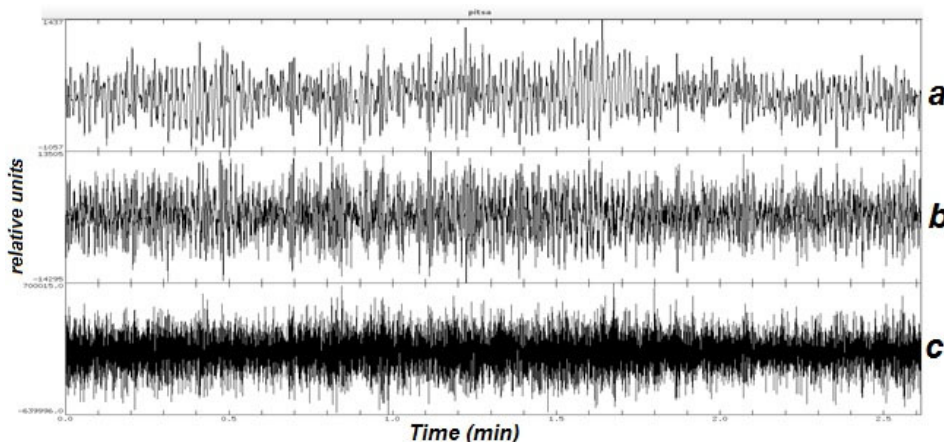


Fig. 11. The measured laser vertical displacement (a) and calculated from it velocity (b) and acceleration (c) for second floor "Kyiv-Pechersk Bell Tower". The altitude of this point is equal 12.56 meters

In the same figures we can see some short external influences that have external technical origins or sources and aren't own microseismic sources of bell tower that has a complicated architecture constructions.

The initial visual and short empirical analysis of all real measured and calculated records shows the availability of random behavior of it in time in case of changing by time of amplitudes all real and calculated records. For receiving of high quality estimates of the random properties of all real and calculated records there must be provided the results of some statistical estimations for receiving of reliable information about their properties. Because the seismic records have a random behavior in time for more effective investigation of this task the middle values of displacement must be calculated, velocity and acceleration for all temporal records, that were made on different floors of the bell tower.

For calculation of the middle values of the amplitudes microseismic record for vertical channel Z on different floors of bell tower (fig. 12) the arrays of real data of displacements were used, calculated velocity and accelerations with quantity more than 10 000 counts, that were measured in nanometers units. The quantity of data more than 10 000 counts in arrays of laser data for different floors bell tower for calculation any statistical parameters is very important because low values of these values may lead to an insignificance of calculated results (table 2). This approach for comparison of significances between different kinds of measurements of microseismic vibrations displacement, velocity and acceleration is very important for successful

building in seismic dangerous areas, because we found that the acceleration significantly exceeds (fig. 12) the values of displacement or velocity for all points that are distributed on different angles for different floors.

For calculation of the variance S of the displacement on different floors of "Kyiv-Pechersk Bell Tower" was used next formula, where X is array of values of displacement:

$$S^2 = \frac{\sum (X - \bar{X})^2}{N - 1}.$$

However, we should remember that the ordinary seismic events are not only ones that can destroy the building. As an example, man-made earthquakes may lead to dangerous situations, for example, as it happened in China with fully new building ([http://truthfrequencyradio.com/...](http://truthfrequencyradio.com/)), fig. 3. For receiving successful results of measurements in defined area, we must select necessary type of basic devices that are more optimal for receiving effective results in areas of researching.

In fig. 4 we can see that the recalculation into new kind type of records may produce unexpected results with negative properties where the forms of calculated records of velocity and acceleration have spoiled numerical forms. Because the new developed laser seismic device that has been presented in this article is a first device, some statistical estimations of the properties for a measured and calculated microseismic records should be provided. The basic variants for this approach may be presented as two next methods:

a) spectral analysis of real laser records of the displacement and calculated from it velocity and acceleration and comparison of them with other real calibrated and

sertificated geophysical devices, that were used in this area for measurements: accelerometer and velocimeter simultaneously (Кендзера, 2015). Some example of spectral researching of vertical laser microseismic records on different floors of "Kyiv-Pechersk Bell Tower" are presented in fig. 13. On third bottom parts of these FFT results for vertical laser we

can see (a) some dominating frequencies that are based on architectural properties of this historical building.

b) special mathematical statistical estimation of real laser microseismic records that were made on different floors (1, 2, 3, 4, 1a) of "Kyiv-Pechersk Bell Tower" (fig. 9b) for determining the properties of randomly made seismic records.

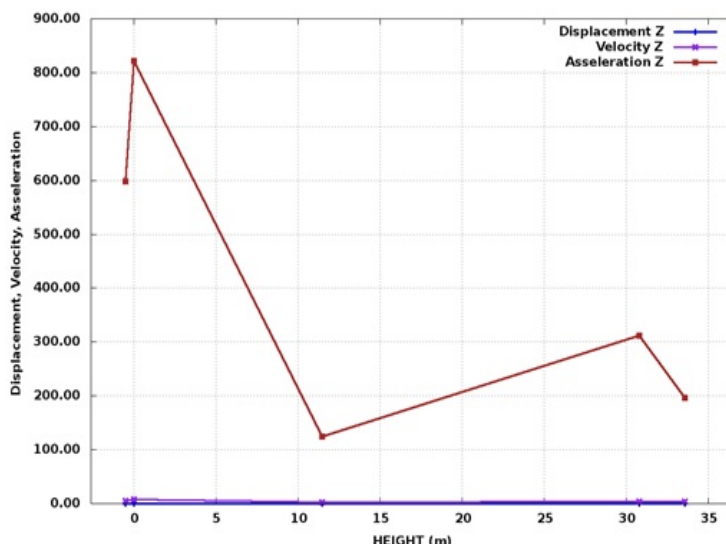


Fig. 12. First empirical statistical estimation of laser seismic records of various types as middle values of it for measured displacement and calculated velocity and acceleration

Table 2

Mean and variance values of measured laser displacements on different values of height					
№	Height (m)	Mean (m)	Variance	Largest	Smallest
1	-0.5	1.79080e-07	1.90047e-14	1.14967e-06	2.14348e-11
2	+0.0	7.68555e-08	3.62683e-15	4.84445e-07	1.82450e-11
3	+11.5	2.82260e-07	4.73211e-14	1.43698e-06	2.29618e-11
4	+30.8	4.14021e-07	1.03988e-13	1.43698e-06	3.06668e-11
5	+33.6	3.38872e-07	6.66760e-14	1.60067e-06	2.60505e-11

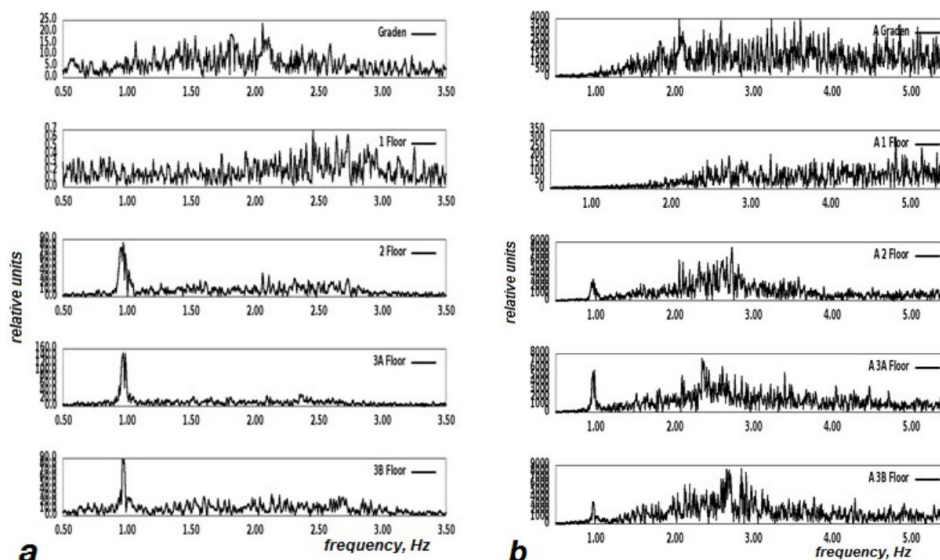


Fig. 13. The spectra of vertical laser measured displacement (a) and calculated acceleration (b) records on 1-3 floors of "Kyiv-Pechersk Bell Tower" and in garden.

On second and third floors have presented specific frequencies that all are equal about 1.0 Hz

As is known, the statistical temporal distribution of microseismic records in any area of Earth has the normal or Gaussian distribution (Maxwell, 2010), that is a very common continuous probability distribution. Normal distributions are important in statistics and are often used in the natural and

social sciences to represent real-valued random variables which distributions are not known. In successful case of using of these methods for statistical estimation of laser records it is more suitable to have the experimental evidence that new developed interferometrical laser is a new device with

important scientific properties that may be used in many technical or scientific areas for new approaches for receiving necessary information for seismic hazard assessment for places where there are the buildings in areas with dangerous geological cavities. (<http://truthfrequencyradio.com/...>). After application of several new numerical methods that were developed on base of using C software (*GNU Scientific*

Library, 2015) and scientific software SCILAB with Opened GNU License (Urroz, n.d.) for calculation and receiving of necessary statistical parameters middle values of the displacement, velocity and acceleration (fig. 11) and calculated histograms (fig. 14) for measured and calculated values of the microseismic vibrations on all areas of measurements "Kyiv-Pechersk Bell Tower" were received.

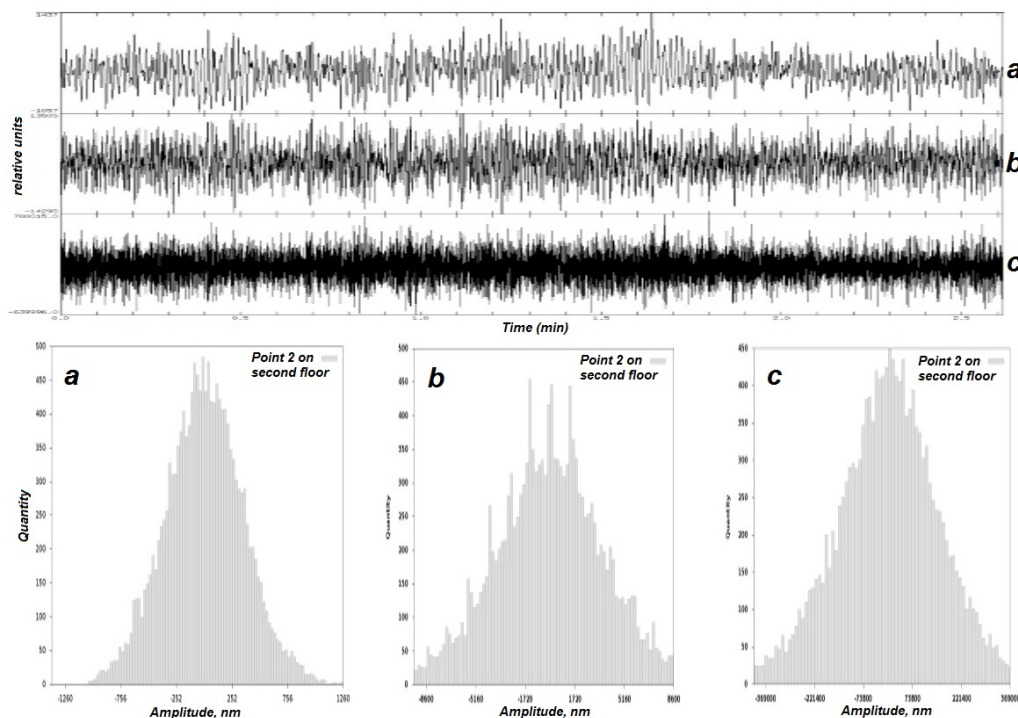


Fig. 14. The histograms for really measured displacement (a) and calculated velocity (b) and acceleration (c)

For higher exactness of evidence of existence of normal (or Gaussian) statistical distributions in time of all measured and calculated values of displacement, velocity and acceleration is more suitable to calculate the cumulative values of the probability for these measured or calculated numerical values. The results of cumulative probabilities of

the values of measured displacement and calculated velocity have been presented in fig. 15. In fig. 15 of statistical estimations for measured displacement (fig. 15a) and calculated velocity (fig. 15b) and acceleration (fig. 15c) we see that they have a significant disturbances of it with different values for these calculated results.

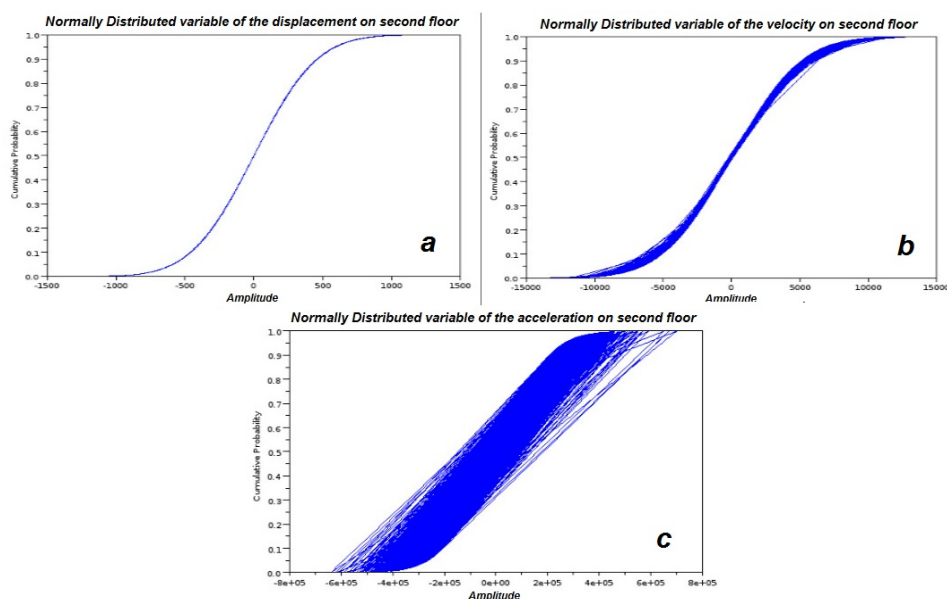


Fig. 15. Statistical estimation of measured displacement and calculated velocity and acceleration on second floor of "Kyiv-Pechersk Bell Tower" as cumulative probabilities of normal distribution of them:
a – for measured displacement; b – for calculated velocity; c – for calculated acceleration

Both these unexpected variances may be based on the limited possibilities of numerical calculations. If we look at fig. 13-a and 13-b we find the zones with randomness of amplitudes for these calculated FFT results on spectral graphs for accelerations. The chaos of amplitude in FFT transforms of calculated acceleration from originally regular signal of displacement may be based on insufficient intervals for digitizing of their values, because the acceleration must be calculated not on frequency 100 Hz but more, and it must be no less than in case of digitization of basic signal of displacement about 1000 Hz.

Conclusions

According to the results of our research, we obtained:

- an extended measurement range in the low-frequency region to almost 0 Hz, which allows using vertical seismometers as delta gravimeters;
- horizontal seismometers can be used as tiltmeters with a resolution of 10–4 rad.sec.;
- open software allows the use of digital laser interferometers not only for measurements, but also for control in closed systems;
- a broadband vibration platform for metrological certification of geophysical instruments was created;
- the statistical estimations all received data by different points had shown that the laser displacement has optimal possibilities to estimate seismic hazard assessment.

References

- Britsky, O., Gorbov, I., Petrov, V., Balagura, I. (2015). A compact semiconductor digital interferometer and its applications. *Proc. SPIE 9506, Optical Sensors 2015*, 95060G. May 5, 2015. dx.doi.org/10.1117/12.2178476
- GNU Scientific Library. (2015). Reference Manual. Edition 2.1, for GSL Version 2.1, 11 Nov. 2015. <https://www.gnu.org/software/gsl/manual/gsl-ref.pdf>
- Gorelik, V.S., Lebedev, P.N. (2013). A semiconductor laser, having visible range as excitation source of combination light scattering. Moscow: Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 10–12 [in Russian].
- <http://truthfrequencyradio.com/tianjin-china-explosion-versus-9-11-wtc-event/>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Kiev_Pechersk_Lavra
- Maxwell, S. (2010). Impact of Microseismic Location Uncertainties on Interpreted Fracture Geometries. *Canadian Journal of Exploration Geophysics*, 35, 01. <http://csegrecorder.com/articles/view/impact-of-microseismic-location-uncertainties-on-fracture-geometries>
- The Effectiveness of a Distant Accelerometer Array to Compute Seismic Source Parameters: The April 2009 L'Aquila Earthquake Case History. (n.d.). <http://www.bssaonline.org/content/101/1/354.short>
- United Nations International Decade for Natural Disaster Reduction (UN/IDNDR) <http://www.seismo.ethz.ch/static/GSHAP/>
- Urroz, G.E. (n.d.). Probability Distributions with SCILAB. https://kipdf.com/probability-distributions-with-scilab-gilberto-e-urroz-phd-pe-distributed-by-i-n_5ace084b7f8b9af88d8b45fc.html
- Yerazunis W.S., Brinkman, D. (2009). Memory-based high-speed interferometer. *Pat. 2009/0112500A1 USA*. Int.Cl. G 01 R 13/00, G 01 R 15/00. Mitsubishi Electric Research Laboratories, Inc. (US). Apr. 30, 2009.
- Отримано редакцією журналу / Received: 05.11.23**
Прорецензовано / Revised: 20.04.23
Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Олександр БРИЦЬКИЙ¹, канд. фіз.-мат. наук
 ORCID ID: 0000-0003-1081-7543
 e-mail: britsky_ai@ukr.net

Сергій ЩЕРБИНА², канд. фіз.-мат. наук
 e-mail: nohup@ukr.net

Петро ПІГУЛЕВСЬКИЙ², д-р геол. наук
 ORCID ID: 0000-0001-6163-4486
 e-mail: pigulev@ua.fm

Юрій ЛІСОВИЙ², мол. наук співроб.
 ORCID ID: 0000-0001-6145-9251
 e-mail: lisovyi@ukr.net

Ірина ЧЕРЕВКО³, канд. соціол. наук
 ORCID ID: 0000-0001-7083-6119
 e-mail: ira071165@yahoo.com

¹Інститут проблем реєстрації інформації НАН України, Київ, Україна

²Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

³Національний Києво-Печерський історико-культурний заповідник, Київ, Україна

НОВИЙ ЛАЗЕРНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ОЦІНКИ СЕЙСМІЧНОГО РИЗИКУ

Багато країн в Європі мають території із сейсмотектонічно активними зонами – Італія, Греція, Румунія та інші. Як відомо, спеціальні урядові та комерційні організації робили багато спроб розв'язати проблеми оцінки сейсмічного ризику в цих країнах за допомогою використання великої кількості різних приладів. Всі популярні в європейських країнах спеціальні прилади для вирішення завдань оцінки сейсмічного ризику поділяються на дві основні групи: акселерометри та велосиметри. На сьогодні для вирішення науково важливих завдань оцінки сейсмічного ризику не існує інших високочутливих приладів для вимірювання рухів ґрунту.

Ці проблеми ґрунтуються на труднощах ефективного виробництва пристроїв для вимірювання зміщень ґрунту. Недоліки цих приладів полягають у впливі температури на механічні та електронні компоненти систем вимірювання переміщення та їхню нестабільність. Вартість приладів для вимірювання зміщень ґрунту, які мають стабілізацію температури, може бути вищою, ніж для приладів, що вимірюють швидкість або прискорення. Широкосмугові сейсмометри з дуже високою точністю вимірювань сейсмічних подій будь-якого типу можуть дозволити собі мати й виробляти лише країни з розвинутою економікою. Також існує багато переваг для необхідності вимірювання зміщень ґрунту замість прискорення або швидкості для будь-яких місць, де наявні сейсμοактивні зони.

Ключові слова: лазерні пристрої, сейсмічність, оцінка ризику, небезпечні зони, будівництво, статистична оцінка.

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

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

УДК 550.834

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.03>Людмила СКАКАЛЬСЬКА, канд. фіз.-мат. наук, мол. наук, співроб.
e-mail: Skakalska.sbigph@gmail.com

Карпатське відділення Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

Андрій НАЗАРЕВИЧ, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук, співроб.
e-mail: nazarevych.a@gmail.com

Карпатське відділення Інституту геофізики імені С.І. Субботіна НАН України, Львів, Україна

Володимир КОСАРЧИН, канд. фіз.-мат. наук, доц.
e-mail: volcos@ukr.net

Львівський національний університет природокористування, Дубляни, Україна

ОЦІНКИ ТРІЩИНУВАТОСТІ ТА ПРОНИКНОСТІ ПОРІД У РОЗРІЗАХ СВЕРДЛОВИН ЗА ПРОГНОЗНОЮ МЕТОДИКОЮ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Карпенком)**Розглянуто способи вивчення петрофізичних характеристик порід із застосуванням розробленої теоретико-емпіричної методики прогнозування нафтогазоносності розрізів свердловин та результати її використання.**У рамках прогнозної методики додатково розроблено способи визначення ряду важливих петрофізичних характеристик порід у розрізах свердловин. Зокрема, за індикатором розкритості тріщин (параметр Q_{side}) оцінено тріщинуватість та проникність порід, за об'ємною густиною та швидкостями пружних об'ємних хвиль – міцність порід, за набором петрофізичних параметрів, включно з густиною твердої фази порід, у прошарках визначено їх типи. Наведено і коротко проаналізовано результати визначення цих параметрів у розрізах свердловин 1-Ліщинської та 4-Північно-Заріччянської.***Ключові слова:** розріз свердловини, прогнозування нафтогазоносності, теоретико-емпірична методика, тип породи прошарку, швидкості пружних об'ємних хвиль, міцність порід, тріщинуватість, проникність.

Вступ

Однією з можливостей нарощування енергетичного потенціалу України є пошуки нових родовищ вуглеводнів, у тому числі родовищ газу ущільнених порід, газоконденсату, сланцевих газу і нафти, метану вугільних родовищ та ін. (Крупський та ін., 2019; Михайлов та ін., 2022; Нова енергія, 2022). У напрямку вирішення цього завдання ми розробили теоретико-емпіричну методику прогнозування нафтогазоносності розрізів свердловин за даними акустичного (АК) та інших каротажів. Подальший розвиток створеної методики дає змогу визначати ряд важливих петрофізичних характеристик порід у розрізах свердловин. Зокрема, розроблено способи: оцінки тріщинуватості та проникності порід за індикатором розкритості тріщин – параметром Q_{side} , визначення типів порід у прошарках розрізів – за густиною їх твердої фази, міцності порід – за об'ємною густиною та швидкостями пружних об'ємних хвиль (V_s , V_p). Так, запропонований спосіб оцінки тріщинуватості та проникності порід за індикатором розкритості тріщин (параметр Q_{side}) не вимагає додаткових спеціальних досліджень, як ряд інших відомих методів (Вижива та ін., 2006; Продай-вода та ін., 2011; Гасеми, Баяк, 2018; Карпенко, 2005), а дає можливість оцінити ці важливі для подальшої ефективної експлуатації досліджених свердловин параметри за даними стандартного акустичного каротажу в рамках створеної нами прогнозної методики (Скакальська, 2014, 2021; Скакальська, Назаревич, 2015, 2016; Скакальська та ін., 2017, 2018; Skakalska et al., 2021).

Методика. Розроблена нами теоретико-емпірична методика прогнозування нафтогазоносності порід розрізів свердловин за даними каротажу та кернових досліджень (Скакальська, 2014, 2021; Скакальська, Назаревич, 2015, 2016; Скакальська та ін., 2017, 2018; Skakalska et al., 2021) побудована як система теоретичних та емпіричних співвідношень із залученням даних акустичного каротажу та кернових досліджень, що об'єднано у відповідний прогнозний функціонал. Теоретичні залежності між пружними параметрами гірських порід виведено з урахуванням впливу тиску (глибини), пористості, нелінійної пружності, структурно-дисперсійних

особливостей гірських порід (шаруватості, мікропористості) з використанням теоретичних напрацювань Гасмана, Ешелбі, Вербицького та інших дослідників. Зокрема, в побудові математичного апарату методики взято за основу модель гірської породи Т.З. Вербицького, в якій виконуються базові умови теорії ефективних середовищ, механіки гірських порід, закони теорії пружності, тобто вона є надійною основою для побудови фізико-математичного апарату нашої методики прогнозування нафтогазоносності розрізів свердловин за даними АК і кернових досліджень, оскільки адекватно описує гірські породи.

Емпіричні залежності між фізичними та колекторськими характеристиками гірських порід побудовано з використанням параметричних баз даних порід-колекторів конкретних територій та геологічних структур, а саме, Західного нафтогазоносного регіону України (ЗНГР). Тип флюїду-заповнювача пор (вода, нафта, газ) у кожному досліджуваному прошарку породи прогнозується порівнянням результатів обчислення швидкостей за побудованими теоретичними та емпіричними залежностями з фактичними даними АК, за визначеною за методикою густиною заповнювача пор або за стисливістю породи. Також розроблено варіанти прогнозної методики з використанням даних гамма-каротажу, електричного каротажу або офсетних даних. Для реалізації прогнозної методики побудовано загальні алгоритми розрахунків та алгоритми роботи окремих програмних модулів, розроблено відповідне програмне забезпечення в середовищах Fortran, C# та Excel (Скакальська та ін., 2017; Скакальська, 2021).

У розробленій авторами прогнозній методиці передбачено розрахунок пористості, швидкостей об'ємних хвиль та набору пружних параметрів для кожного досліджуваного прошарку розрізу свердловини (Скакальська, 2014, 2021; Скакальська, Назаревич, 2015, 2016; Скакальська та ін., 2017, 2018; Skakalska et al., 2021). Під час практичного застосування методики до розрахунків залучається значний обсяг апріорної петрофізичної інформації – дані кернових досліджень по конкретній свердловині (за наявності), по сусідніх свердловинах із врахуванням міжсвердловинної кроскореляції, по

досліджуваній площі, родовищу, території. Додатково, у разі потреби, до досліджень залучаються дані інших каротажних методів по цій свердловині і різні петрофізичні та статистичні (кореляційні) залежності (Скакальська, 2021; Скакальська та ін., 2018; Skakalska et al., 2021).

Тестування методики і програмно-алгоритмічного комплексу проведено на реальних даних розрізів ряду свердловин нафтогазоносних структур ЗНГР – Бучацької, Залужанської, Зарічнянської, Орховицької, Никловицької, Ліщинської та ін. (рис. 1). Отримано значення

пружних і колекторських характеристик із хорошим узгодженням з даними інших досліджень, наприклад, для коефіцієнта пористості порід – до 94 %; відхилення величин, розрахованих засобами методики швидкостей пружних хвиль від даних АК, отримано в середньому 4,73 %; тип заповнювача пор у кожному прошарку порід у розрізах тестованих свердловин збігся з даними ГДС (Скакальська, 2021; Куровець та ін., 2009, 2010, 2014).

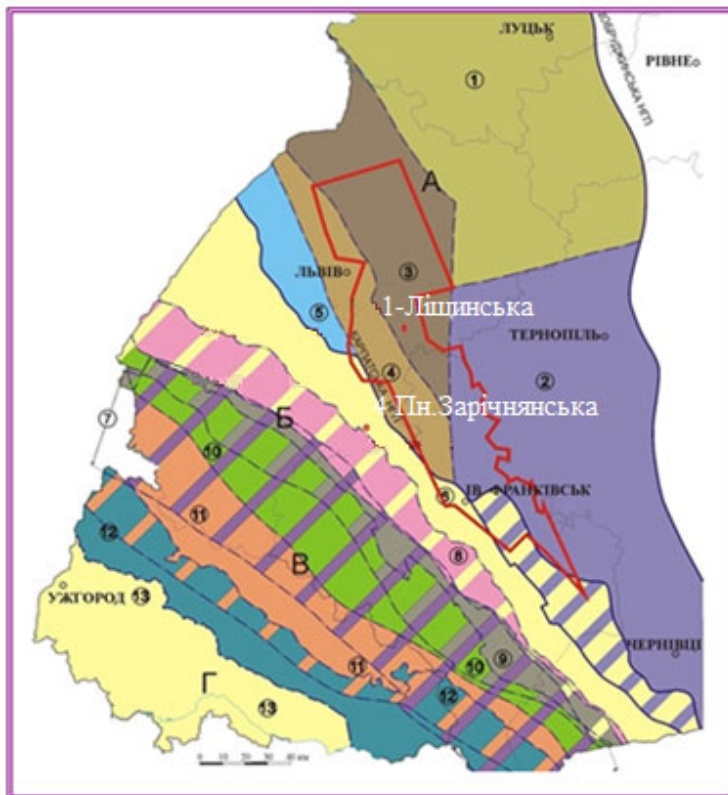


Рис. 1. Локалізація досліджених свердловин на карті-схемі тектоніки Західного нафтогазоносного регіону України за даними ЛВ УкрДГРІ

За допомогою визначених величин пористості для шарів і прошарків із спрогнозованим флюїдом пор виходимо на потенційну оцінку продуктивності такого інтервалу розрізу свердловини.

До цього зауважимо, що отримані за результатами наших досліджень великі величини пористості окремих прошарків відображають тріщини чи мезомасштабні тріщинуваті зони (часто субгоризонтальні). Це є одним із цінних для подальшої ефективної експлуатації досліджених свердловин результатів застосування наших методик і підходів з розбиттям розрізу свердловини на умовні прошарки відповідно до кроку за глибиною даних АК, що дає можливість диференційовано визначати характеристики кожного прошарку, не нівелюючи їх за рахунок впливу характеристик сусідніх прошарків.

Також слід відзначити, що певні труднощі під час інтерпретації даних АК викликає проблема надійного врахування впливу на результати каротажу зони проникнення промивної рідини. Не заглиблюючись тут у цю проблематику, яка вимагає спеціального окремого детального розгляду, вкажемо, що створена авторами прогностна методика об'єднує кілька способів уточненого визначення пористості порід і прогнозування типу флюїду – заповнювача пор з урахуванням відповідних

поправок (за різницю між лабораторними визначеннями пористості порід і пористістю їх за АК, за глинистість порід та ін.), і дає змогу надійно розрізняти тип флюїдозаповнення, навіть за відносно невеликої "активної" (заповненої "рідним" первинним флюїдом) пористості, як-то у випадку заміщення для значної частини відкритих пор "рідного" первинного флюїду промивною рідиною. Це досягається завдяки тому, що акустичні хвилі проходять через весь зондований об'єм породи і несуть інформацію про тип флюїдозаповнення всіх зустрінутих на своєму шляху пор (зокрема, і тих, у яких залишився "рідний" первинний флюїд).

У процесі подальшого розвитку прогностної методики розроблено способи визначення ряду важливих петрофізичних характеристик порід у розрізах свердловин, які викладено нижче.

Оскільки у методиці розраховуються значення параметра V_s/V_p та коефіцієнта Пуассона (Скакальська, Назаревич, 2016; Skakalska et al., 2021), то, з використанням підходів А. Тимурзієва (Тимурзієв, 1991), ці результати додатково застосовано для розрахунку коефіцієнта розкритості тріщин – параметра Q_{side} , а, отже, далі, за значеннями Q_{side} маємо можливість оцінювати тріщинну пористість та проникність порід прошарків

розрізу свердловини (Шашенко та ін., 2003), наприклад, прошарки з закриванням тріщин визначаємо за перепадом тисків, особливостями переходу (трансформації) гірського тиску в боковий.

Спосіб визначення тріщинуватості та проникності порід за індикатором розкритості тріщин – параметром Q_{side} .

Коефіцієнт бокового розпору Q_{side} визначається як коефіцієнт пропорційності у відношенні бокового тиску до гірського, тобто є індикатором розкритості тріщин (Тимурзієв, 1991; Шашенко та ін., 2003; Попов, 2013):

$$Q_{side} = P_{\text{боковий}} / P_{\text{гірський}}.$$

За формулою А.Н. Динника (Шашенко та ін., 2003) коефіцієнт бокового розпору визначається так:

$$Q_{side} = v / (1 - v),$$

де v – коефіцієнт Пуассона, його отримуємо в результаті розрахунків за методикою.

Оцінки тріщинної пористості – основи фільтраційної системи порід-колекторів – виконуються аналітично та на графіках за зміною параметра V_s/V_p , за високим коефіцієнтом пористості у тонких прошарках породи та високою стисливістю, оскільки ці фізичні характеристики середовища взаємопов'язані (Скакальська, 2021):

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{0,5 - v}{1 - v}}, \quad v = \left[0,5 - \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \right] / \left[1 - \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2 \right],$$

$$v = \frac{Q_{side}}{1 + Q_{side}}.$$

Тоді, за розрахованими засобами прогнозу методикою значеннями коефіцієнта Пуассона v чи параметра V_s/V_p (спрогнозованими даними швидкостей об'ємних хвиль) формулу А.Н. Динника для розрахунку коефіцієнта Q_{side} отримуємо таку:

$$Q_{side} = 1 - 2 \cdot \left(\frac{V_s}{V_p} \right)^2.$$

Зазначимо, що оцінки за описаним способом величини відкритої пористості дають змогу певним чином розв'язати згадану вище проблему впливу на результати АК зони проникнення промивної рідини. Завдяки оцінкам (разом з визначеннями за методикою загальної пористості порід прошарків) можна оцінити прогнозний ступінь заміщення первинного флюїду промивною рідиною і ввести відповідні коректувальні коефіцієнти – поправки при прогнозуванні типу флюїдонасичення як за стисливістю порід, так і за швидкостями пружних хвиль чи розрахованою густиною флюїду, що заповнює пори. Поглиблене вивчення цих питань буде предметом наших подальших досліджень.

Спосіб визначення типу породи за густиною її твердої фази ρ_T та оцінки міцності порід.

Нагадаємо, що для математичного апарату нашої прогнозу методикою будуються конкретні емпіричні співвідношення зв'язку характеристичних параметрів порід-колекторів за експериментальними даними для конкретних досліджуваних територій. У процесі досліджень для основного досліджуваного у методиці параметра – стисливості – побудовано уточнені емпіричні залежності від пористості та діючого тиску (глибини) з мультиплікативною складовою для тиску і пористості. Це дало змогу отримувати уточнені значення стисливості та пористості для породи кожного досліджуваного прошарку (Скакальська, 2021; Skakalska et al., 2021),

а тим самим – стисливості та густини твердої фази для породи прошарку.

Значення густини твердої фази порід ρ_T , виходячи з даних прогнозування, визначаємо за формулою

$$\rho_T = \frac{\rho^o - \frac{\phi}{100} \cdot \rho_{fl}}{1 - \frac{\phi}{100}},$$

де ρ^o , ρ_{fl} – густини: об'ємна та флюїду пор, ϕ – пористість породи прошарку.

За густиною твердої фази породи, а у складних випадках – за набором розрахованих параметрів (пористість, об'ємною густиною та густиною твердої фази), для порід прошарків визначаємо їх типи порівнянням з даними лабораторних петрофізичних досліджень. Для конкретних свердловин отримано узгодження наших результатів (у т. ч. наведених нижче) з даними ГДС (Куровець, 2010; Куровець та ін., 2014).

Для оцінки міцності порід розрізів свердловин використовуємо модуль зсуву μ : $\mu = V_s^2 \cdot \rho^o$, порівнюючи його значення, отримані за методикою, з максимальними значеннями лабораторних визначень тиску прориву вуглеводнів через водонасичені породи для умов залягання відповідного прошарку в розрізі (глибин, тисків, температур). Результати цих досліджень є важливими, зокрема у застосуванні методик гідророзриву пласта.

Приклади визначення петрофізичних характеристик порід розрізів свердловин.

1. *Свердловина 1-Ліщинська, інтервал розрізу 2020–3540 м.* Для дослідженого інтервалу глибин використано дані АК для 308 прошарків (з різним кроком за глибиною). За теоретико-емпіричною прогнозуною методикою інтервал 2020–2150 м визначено як практично непроникний. З 2150 м пористість зростає з 1,5 % до 6–7 %, що свідчить про наявність тут малопроникних колекторів (рис. 2). Інтервал 2500–3540 м спрогнозовано продуктивним газонасиченим (пористість близько 10 % і вище). Зафіксовано ряд високопроникних (з пористістю вище 25 %) прошарків, перспективних для високого припливу вуглеводнів. Загалом спрогнозовано 286 прошарків з газом (57 шарів завтовшки від 1 до 25 м), десять шарів з водою (товщина від 3 до 15 м) та 17 практично непроникних, з пористістю до 1,5 %.

Узагальнені результати розрахунку петрофізичних характеристик порід розрізу св. 1-Ліщинська наведено в табл. 1 і графічно подано на рис. 2.

Визначені величини густин порід у прошарках лежать у межах 1581,7÷2678,6 кг/м³, густини, характерні для алевритів – від 1581,7÷2600 кг/м³, а 2250÷2678,6 кг/м³ – характерні для пісковиків. Значення швидкостей (колонки 2 і 3 табл. 1 – лежать у межах 2830÷6731 м/с для V_p , 1748÷3826 м/с для V_s) та густин твердої фази порід прошарків (колонки 5 і 6 табл. 1 – лежать у межах 2669,51÷2699,12 кг/м³) підтверджують типи порід – аргіліти / пісковики на досліджуваному інтервалі розрізу.

Виявлено значну залежність модуля зсуву від пористості: модуль зсуву (як і міцність породи) значно зростає зі зменшенням пористості, зокрема, для прошарків-екранів (рис. 2). Корелюють величини коефіцієнта розкритості тріщин та коефіцієнта Пуассона (рис. 2, в); також аналіз результатів показав, що наявний додатковий вплив на ці величини інших, врахованих у методиці параметрів (тиски – навантаження, густини – тип породи).

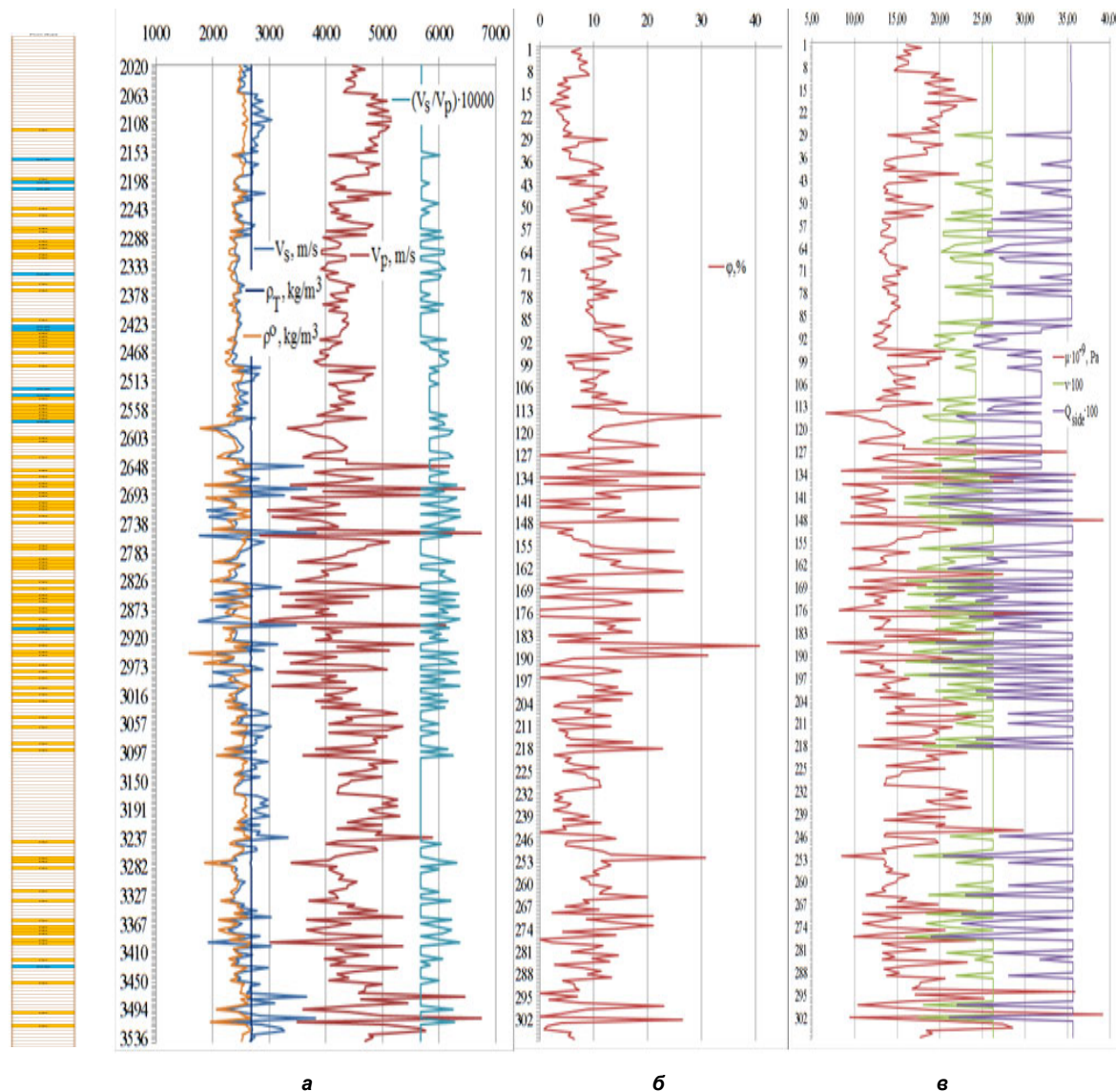


Рис. 2. Прогноз за методикою для прошарків розрізу свердловини 1-Ліщинська: типу заповнювача пор (практично непроникні породи – білим, із заповнювачем пор газом – жовтим, з водою – голубим), швидкостей об'ємних хвиль (V_s та V_p) і густин об'ємної та твердої фази породи (ρ^0 та ρ_T) (а); пористості (ϕ) (б); модуля зсуву μ , коефіцієнта Пуассона ν , коефіцієнта розкритості тріщин Q_{side} (в)

Таблиця 1

Узагальнені результати розрахунку петрофізичних характеристик порід розрізу св. 1-Ліщинська

1-Ліщинська	ϕ , %	V_p , м/с	V_s , м/с	V_s/V_p	ρ^0 , кг/м ³	ρ_T , кг/м ³	μ , Па·10 ⁻¹¹	Q_{side}	ν	Тип породи
Максимальне	40,75	6741,57	3826,18	0,64	2678,60	2699,12	0,39	0,36	0,26	Аргіліти, пісковики
Мінімальне	0,09	2830,19	1748,35	0,57	1581,70	2669,51	0,07	0,19	0,16	
Середнє	9,57	4396,54	2550,81	0,58	2423,59	2679,95	0,16	0,32	0,24	

2. Свердловина 4-Північно-Зарічянська, інтервал розрізу 3-1190 м. Для дослідженого інтервалу глибин використано дані з las-файлів – дані ГК, також дані методу ПС і дані офсетів – три варіанти даних для 429 прошарків (з різним кроком за глибиною). Узагальнені

результати розрахунку петрофізичних характеристик порід розрізу св. 4-Північно-Зарічянська за теоретико-емпіричною прогнозною методикою наведено в табл. 2 і графічно подано на рис. 3.

Таблиця 2

Узагальнені результати розрахунку петрофізичних характеристик порід розрізу св. 4-Північно-Зарічянська

4-Північно-Зарічянська	ϕ , %	V_p , м/с	V_s , м/с	V_s/V_p	ρ^0 , кг/м ³	ρ_T , кг/м ³	μ , Па·10 ⁻¹¹	Q_{side}	ν	Тип породи
Максимальне	41,73	4721,19	2751,74	0,69	2681,70	3113,90	8,87	0,94	0,49	Пісковики, алевроліти
Мінімальне	8,97	713,52	362,81	0,30	1861,70	2429,62	0,43	0,21	0,17	
Середнє	27,28	3819,26	2259,41	0,60	2552,26	2762,40	3,72	0,67	0,40	

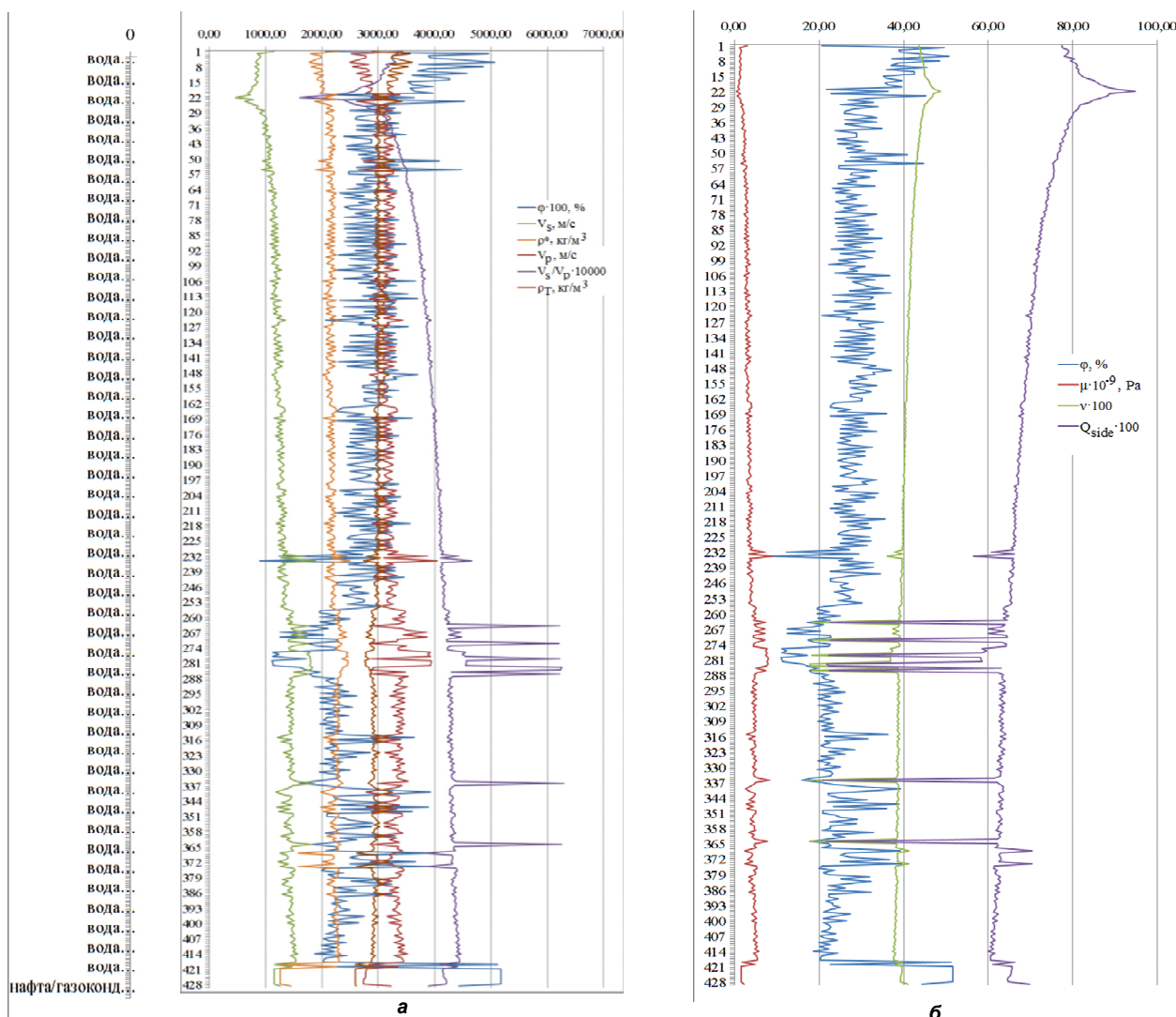


Рис. 3 Розрахунок за прогнозною методикою для прошарків розрізу свердловини 4-Північно-Зарічннська: типу заповнювача пор, пористості (ϕ), швидкостей об'ємних хвиль (V_s та V_p), параметра V_s/V_p , густин об'ємної та твердої фази породи (ρ^s та ρ_T) (а); пористості (ϕ), модуля зсуву μ , коефіцієнта Пуассона ν , коефіцієнта розкритості тріщин Q_{side} (б)

Інтервал 3÷1099 м визначено обводненим, інтервал 1099,5÷1190 м – з прогнозним флюїдом-заповнювачем пор – нафтою/газоконденсатом (12 прошарків). Визначена загальна пористість змінюється в межах 8,97÷41,73 %, що свідчить про наявність тут колекторів.

Визначені величини густин порід у прошарках лежать у межах 1861,7÷2681,7 кг/м³ і характерні для алевролітів та пісковиків. Значення швидкостей (колонки 2 і 3 табл. 2) лежать у межах 713÷4721 м/с для V_p , 362÷2751 м/с для V_s , густин твердої фази порід прошарків (колонки 5 і 6 табл. 2), в основному лежать у межах 2429,62÷2762,40 кг/м³ і підтверджують типи порід – алевроліти / пісковики.

Для порід розрізу спрогнозовано коливання значень модуля зсуву в межах $0,43 \cdot 10^{11}$ ÷ $8,87 \cdot 10^{11}$ Па, за середнього значення – $3,72 \cdot 10^{11}$ Па, коефіцієнта Пуассона 0,17÷0,49, коефіцієнта розкритості тріщин 0,21÷0,94; для прошарків зі спрогнозованим заповнювачем пор – газоконденсатом, пористість отримано в середньому близько до 29 %. Виявлено, що у прошарках з газом коефіцієнт Пуассона значно (майже удвічі) менший від такого у прошарках із заповнювачем пор – водою.

Висновки

В рамках розвитку створеної теоретико-емпіричної методики прогнозування нафтогазоносності порід розрізів

свердловин розроблено способи визначення ряду важливих петрофізичних характеристик порід у цих розрізах. Зокрема, за індикатором розкритості тріщин – параметром Q_{side} , оцінено тріщинуватість та проникність порід, за об'ємною густиною та швидкостями пружних об'ємних хвиль – міцність порід, за набором петрофізичних параметрів включно з густиною твердої фази порід у прошарках визначено їх типи. Наведено і коротко проаналізовано результати визначення цих параметрів у розрізах двох свердловин: 1-Ліщинської та 4-Північно-Зарічннської.

Показано, що засобами теоретико-емпіричної методики можливо оцінювати розкритість тріщин, а отже, проникність порід розрізу свердловини. Це дає змогу оцінювати потенційну продуктивність конкретних інтервалів розрізів свердловин, а також можливість відновлення продуктивності за рахунок надходження вуглеводнів з глибини, враховуючи виявлені впродовж останніх десятиріч випадки відновлення запасів на низці відпрацьованих родовищ, що підтверджує гіпотезу безперервного "газового дихання Землі" (Лепігов та ін., 2012).

Одним із подальших напрямів наших досліджень буде врахування впливу глибинних температур на петрофізичні характеристики порід розрізів свердловин.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Продайвода, Г.Т., Безродна, І.М. (2006). Петрофізичні дослідження як основа для розробки моделі структури пустотного простору складнообудованих карбонатних порід-колекторів. *Зб. наук. праць "Перспективи нагромадження та збереження енергетичних ресурсів України"*. Факел, 110–121.
- Гасеми, М.Ф., Баюк, І.О. (2018). Петроупругое моделирование карбонатных пород-коллекторов с использованием модели двойной пористости. *Экспозиция Нефть Газ*, 65, 5, 21–25.
- Карпенко, О.М. (2005). Науково-методичні засади оцінки ємнісних властивостей порід тонкошаруватих розрізів родовищ вуглеводнів за даними геофізичних досліджень. Дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.22. Івано-Франківський національний технічний ун-т нафти і газу.
- Крупський, Ю.З., Марусяк, В.П. (2019). Минулі результати і подальші перспективи західного нафтогазоносного регіону України. *Нафтогазова аналіз України*, 4, 6–10.
- Куровець, І.М. (2010). Геолого-петрофізична характеристика басейнових дрібнозернистих порід силуру південно-західного краю Східноєвропейської платформи. *Збірник наукових праць ІГН НАНУ*, 3, 287–293.
- Куровець, І.М., Питулька, Г.І., Шира, А.І., Шуфляк, Ю.Є. (2009). Загальна характеристика петрофізичних властивостей порід донеогенової основи Зовнішньої зони Передкарпатського прогину. *Геоінформатика*, 48–55.
- Куровець, І.М., Сеньковський, І.М., Михайлов, В.А., Дригант, Д.М., Крупський, Ю.З., Гладун, В.В., Чепіль, П.М., Гулій, В.М., Куровець, С.С., Шлапінський, В.С., Шлапінський, Ю.В., Колтун, Ю.В., Чепіль, В.П., Бодлак, В.П. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Книга II. Західний нафтогазоносний регіон. Ніка-Центр.
- Лепігов, Г., Гулій, В., Локтев, А., Манюк, М., Гоптарьова, Г. (2012). Нафта Передкарпаття. *Геолог України*, 3, 66–77.
- Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Крупський, Ю.З., Куровець, І.М., Коваль, А.М., Касянчук, С.В., Вакарчук, С.Г., Харченко, М.В. (2022). Перспективи нагромадження ресурсної бази вуглеводнів України за рахунок нетрадиційних джерел. <http://www.kdpu-nt.gov.ua/uk/content/perspektyvy-naroshchuvannya-resursnoyi-bazy-vuglevodniv-ukrayiny-za-rahunok-netradyciynih>
- Нова енергія. (2022). Показники нових бізнес-напрямів для забезпечення переходу від видобувної компанії до національної енергетичної платформи. Показники за 2021 рік. Отримано 19.09.2022 з <https://www.naftogaz.com/business/new-energy-business-unit>
- Попов, А.Н., Головкина, Н.Н., Исмаков, Р.А., Попов, М.А. (2013). Способ определения статистических характеристик коэффициента бокового распора пласта пористой горной породы. *Патент РФ 184232*.
- Продайвода, Г.Т., Вижва, С.А., Безродна, І.М., Продайвода, Т.Г. (2011). Геофізичні методи оцінки продуктивності колекторів нафти і газу. ВПЦ "Київський університет".
- Скакальська, Л.В. (2014). Прогнозирование физических и коллекторских свойств пород-коллекторов для поиска нетрадиционного газа. *Ежемесячный научный журнал "SOCAR Proceedings"*, 1, 4–10. DOI: 10.5510/OGP.20140100182.
- Скакальська, Л.В., Назаревич, А.В. (2015). Прогнозування нафтогазоводонасиченості порід різної літології та геодинамічного генезису у розрізах свердловин. *Геодинаміка*, 1(18), 102–119. DOI: 10.23939/jgd2015.01.099.
- Скакальська, Л.В., Назаревич, А.В. (2016). Узагальнені співвідношення для методики прогнозування водонафтогазонасиченості порід розрізів свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 60–69.
- Скакальська, Л.В., Назаревич, А.В., Струк, Є.С. (2017). Алгоритми та програми обробки каротажних даних у прогнозуванні нафтогазоносності порід розрізів свердловин. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні науки та інформаційні технології"*, 864, 210–221.
- Скакальська, Л.В., Назаревич, А.В., Косарчин, В.І. (2018). Теоретико-емпірична методика прогнозування вуглеводнів у розрізах свердловин з базовим параметром – стисливістю. *Мінеральні ресурси України*, 4, 18–25. DOI: 10.31996/mru.2018.4.18–25.
- Скакальська, Л.В. (2021). Прогнозування пружних характеристик та нафтогазоводонасиченості порід у розрізах свердловин за даними акустичного каротажу і кернових досліджень. Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. ІГФ НАН України.
- Тимурзіев, А.І. (1991). Способ оценки экранирующих свойств горных пород. *Патент АС СССР 1676359*. Класс G 01V1/40. Зареєстровано в Госреестре изобретений 08.05.1991. Приоритет изобретения 26.09.88.
- Шашенко, А.Н., Пустовойтенко, В.П. (2003). Механика горных пород. Новый друк.
- Skakalska, L., Nazarevich, A., Kosarchyn, V. (2021). The theoretical-empirical technique of hydrocarbons prediction in wells sections. New aspects. *Геофизический журнал*, 43, 1, 160–180. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225545.
- Skakalska, L., Nazarevich, A., Kosarchyn, V. (2021). The theoretical-empirical technique of hydrocarbons prediction in wells sections. New aspects. *Geophys. Journal*, 43, 1, 160–180. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225545.
- Skakalska, L.V. (2014). Prediction of physical and reservoir properties of reservoir rocks for the search for unconventional gas. *Monthly scientific journal "SOCAR Proceedings"*, 1, 4–10. DOI: 10.5510/OGP.20140100182 [in Russian].
- Skakalska, L.V. (2021). Prediction of the elastic properties and oil-gas-water-saturation of rocks in wells sections according to data of acoustic logging and core' researches. *Extended abstract of candidate's thesis (Phys.-Math.)*. IGF of NAS of Ukraine [in Ukrainian].
- Skakalska, L.V., Nazarevich, A.V. (2015). Prediction of oil and gas oversaturation of rocks of different lithology and geodynamic genesis in well sections. *Geodynamics*, 1(18), 102–119. DOI: 10.23939/jgd2015.01.099 [in Ukrainian].
- Skakalska, L.V., Nazarevich, A.V. (2016). Generalized relations for the method of Predicting the water-oil-gas saturation of rocks of well' sections. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(72), 60–69 [in Ukrainian].
- Skakalska, L.V., Nazarevich, A.V., Kosarchyn, V.I. (2018). Theoretical-empirical technique for predicting hydrocarbons in well sections with the basic parameter – compressibility. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 18–25. DOI: 10.31996/mru.2018.4.18–25 [in Ukrainian].
- Skakalska, L.V., Nazarevich, A.V., Struk, E.S. (2017). Algorithms and programs for processing logging data in predicting the oil and gas bearing capacity of well sections. *Bulletin of Lviv Polytechnic National University "Computer Sciences and Information Technologies"*, 864, 210–221 [in Ukrainian].
- Timurziev, A.I. (1991). Method of estimating shielding properties of rocks. *Patent AS USSR 1676359*. Class G 01V1/40. 3. Applicable to the State Register, invented on 05.08.1991. Priority of invention 26.09.88 [in Russian].
- Vyzhva, S.A., Prodayvoda, G.T., Bezrodna, I.M. (2006). Petrophysical studies as a basis for developing a model of the void space structure of complex carbonate reservoir rocks. *Collection of science works "Prospects for increasing and preserving the energy resources of Ukraine"*. Fakel, 110–121 [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 04.03.23
Прорецензовано / Revised: 16.06.23
Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Ludmyla SKAKALSKA, PhD (Phys. & Math.), Junior Researcher

e-mail: Skakalska.sbigph@gmail.com

Carpathian Branch of S. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Andriy NAZAREVICH, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher

e-mail: nazarevych.a@gmail.com

¹Carpathian Branch of S. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine

Volodymyr KOSARCHYN, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

e-mail: volcos@ukr.net

Lviv National University of Nature Management, Dublyany, Ukraine

ESTIMATES OF FRACTURE AND PERMEABILITY OF ROCKS IN WELL SECTIONS ACCORDING TO THE PREDICTING METHOD

The article is devoted to highlighting the methods of studying the petrophysical characteristics of rocks using the developed theoretical-empirical method for predicting the oil and gas capacity of well sections and their results.

As a part of the predictive method, methods for determining a number of important petrophysical characteristics of rocks in well sections were additionally developed. In particular, cracking and permeability of rocks is estimated by the indicator of crack opening – the Q_{side} parameter, the strength of rocks is estimated by volume density and velocities of elastic bulk waves, and the types of rocks in layers are determined by a set of petrophysical parameters, including the density of the solid phase of rocks.

The determining results of these parameters in sections for wells 4-North-Zarichnyans'ka and 1-Lishchyns'ka, are given.

K e y w o r d s : well section, predicting of oil and gas capacity, the theoretical-empirical technique, a layer rock type, elastic bulk wave velocities, rock strength, fracturing, permeability.

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

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

УДК 550.552.53.553

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.04>

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

ORCID ID: 0000-0002-6835-5276

e-mail: bezin3@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Дмитро БЕЗРОДНИЙ, канд. геол. наук, доц.

e-mail: manific2@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

АНАЛІЗ МАГНІТНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ЗРАЗКІВ ПОРІД ПОЛІГОНУ КРИВОРІЗЬКОЇ НАДГЛИБОКОЇ СВЕРДЛОВИНИ

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

Розуміння причин та принципів анізотропії гірських порід відкриває шлях до оцінки геодинамічних процесів регіонів, дає змогу простежувати зміни геологічних факторів, що її формують, отримувати інформацію про структуру та напрямки динаміки гірських порід тощо.

Метою роботи є вивчення природи магнітної анізотропії колекції з 26 зразків, відібраних зі свердловини "Супутник-2" (490–2720 м) Криворізької надглибокої свердловини. Зразки представлені такими породами: сланці біотитові, гнейси, залізнисті кварцити, кварцити мусковітові, граніти мікроклін-плагіоклазові. Досліджено магнітну сприйнятливість зразків у формі куборомбододекаедрів за допомогою апаратури серії KLY-2 та виконано первинну обробку результатів вимірювань і розрахунок параметрів анізотропії в програмі ANIZO10.

У результаті аналізу визначено такі параметри: значення магнітної сприйнятливості (χ); статистична величина стандартного відхилення; нормальні значення магнітної сприйнятливості по трьох осях; коефіцієнти, що характеризують магнітну анізотропію ($H_1 - H_6$); кут магнітного схилення (D) та кут магнітного нахилення (I).

На основі практичної схеми обробки даних виконано початкову класифікацію порід. Під час аналізу розрахунків за формою еліпсоїда магнітної сприйнятливості отримано чотири класи порід: у вигляді сфери (12 %), сплющеного (46 %), тривісного (23 %) і еліпсоїда складної форми (19 %). Це говорить про комплексні геологічні умови, у яких утворювались породи зі свердловини "Супутник-2", що за попередніми петрографічними і акустичними дослідженнями авторів підтверджується тим, що зразки належать до VII–X тектонофацій.

Запропоновано дослідження коефіцієнта диференціальної магнітної анізотропії, який розрахований за аналогією з акустичною анізотропією. За результатами розрахунків встановлено, що зразків з низькою магнітною анізотропією є тільки 3,8 % від усієї кількості зразків, у свою чергу, високоанізотропних зразків у складі колекції – 53,8 % від загальної кількості, що говорить про різноманітність процесів, що впливали на породи під час їх утворення.

Коефіцієнт акустичної анізотропії зразків свердловини за попередніми дослідженнями авторів також варіює від 2,8 до 24,9 %, симетрія акустичного тензору більшості текстур порід є ромбічною.

Фінальним у порівнянні результатів досліджень параметрів акустичної і магнітної анізотропії став тектонофаціальний аналіз отриманих даних. Встановлено, що як магнітні, так і акустичні коефіцієнти анізотропії, розраховані з відповідних тензорів, відображають зміни тектонофаціальних умов утворення досліджених порід.

Ключові слова: магнітна анізотропія, куборомбододекаедр, класифікація, акустична анізотропія.

Вступ

Вивчення магнітної анізотропії гірських порід має істотне значення в геології і геофізиці. Магнітна анізотропія є важливим інструментом для вивчення структури земної кори та мантиї.

Стан проблеми. Гірські породи, як відомо, мають магнітну анізотропію, причиною якої є наявність у породах магнітної текстури – упорядкованого розташування в породи магнітних мінералів, що виникли під впливом геологічних чинників у реальній геологічній обстановці. Розуміння причин та принципів магнітної анізотропії гірських порід відкриває шлях до вивчення геодинамічних процесів у складних геологічних регіонах; дає змогу простежувати зміни геологічних і фізичних факторів, що її формують; отримувати інформацію про структуру гірських порід. Теоретичною основою методу дослідження магнітної анізотропії метаморфічних порід є концепція їх магнітної текстури як характеристики, що фіксує умови їхнього утворення та багатофазного перетворення.

Гірські породи за час свого існування внаслідок діяльності різних тектонічних процесів можуть піддаватися як пружним, так і пластичним деформаціям. Водночас зміна магнітної текстури сильно залежить від реологічних властивостей мінеральної матриці.

Зростання упорядкованості магнітних зерен пов'язане також із впливом механічних напруг у процесі метаморфізму. Під дією напруг виникають різні типи деформацій порід, які супроводжуються зміною орієнтування феромагнітних зерен. За більш високих ступенів

метаморфізму магнітна анізотропія залишається майже незмінною, а за дуже високих ступенях спостерігається її зменшення (Гузій, 1999; Lanza, Meloni, 2006; Tarling, Hrouda, 1993; Stacey, Banerjee, 1974 та ін.).

Так, врахування особливостей намагнічування і "великої" структурної неоднорідності гірських порід дали змогу вченим виділити три види магнітної анізотропії:

- 1) природну анізотропію, зумовлену кристалографічною текстурою мінералів;
- 2) анізотропію форми тіла, зумовлену ефектом розмагнічування (що виявляється під час намагнічування в земному магнітному полі рудних тіл, складених сильно-магнітними породами);
- 3) анізотропію, зумовлену великою структурною неоднорідністю (текстурою породи в цілому).

У гірській породі співіснують дві складові частини магнітної текстури: текстура доменів і текстура осей легкого намагнічування. Перша з них визначає наявність у породі залишкової намагніченості і є "м'якою" частиною магнітної текстури в тому плані, що вона може бути зруйнована сильними магнітними полями. Друга є "жорсткою" частиною магнітної текстури і може бути перебудована тільки шляхом зміни положення феромагнітних зерен у породі або зміною самих зерен.

Отже, фундаментальною особливістю гірських порід є наявність магнітної текстури – закономірного розташування характерних магнітних елементів у породі, що виникли під впливом геологічних процесів у реальній геофізичній обстановці (Гузій, 1999).

© Безродна Ірина, Безродний Дмитро, 2023

Гірським породам притаманні, окрім текстурних, також різноманітні наведені компоненти магнітної анізотропії. Наведена магнітна анізотропія є результатом дії на феромагнетик різних додаткових факторів, що змінюють їх магнітний стан.

Метою роботи є вивчення природи магнітної анізотропії колекції зразків, відібраних зі свердловини "Супутник-2" (490–2720 м) Криворізької надглибокої свердловини.

Регіон досліджень приурочений до центральної частини Ганнівської синкліналі, яка представлена породами новокриворізької, скелеватської, саксаганської, гданцевської та глеуватської світ. У геологічному розрізі свердловини "Супутник-2" присутні потужні пачки гнейсів і сланців біотитових, амфібол-біотитових, діопсид-біотитових, графітових і графіт-біотитових, менш потужні прошки залізистих кварцитів і силікатних сланців, а також кварцити, кварцито-пісковики андалузит-мусковітові та ставроліт-андалузит-мусковітові, амфіболіти та невеликі за розмірами тіла мікроклін-плагіоклазових гранітів і альбітизованих і мікроклінізованих плагіогранітів багатократно катаклазованих (по архейських плагіогранітоїдах) (Безродний, 2008, Продайвода та ін., 2011).

За попередніми дослідженнями авторів зразки свердловини "Супутник-2" представлені найбільш високобальними тектонофаціями VII–X мезозони, де тектонофація X маркує мілонітовий шов, а тектонофація VII – ділянки відносно найбільш грубого дроблення порід. На незначних інтервалах породи зазнали впливу крихко-в'язкої та крихкої тектоніки вторинної епізони (Продайвода та ін., 2011).

Об'єктом дослідження в роботі є метаморфічні породи, зокрема гнейси, біотитові, мусковітові, магнетитові кварцити та сланці у формі куборомбододекаедрів та їх магнітні властивості.

Методи

Автори дослідили магнітну сприйнятливість 26 зразків у формі куборомбододекаедрів та виконали первинну обробку результатів вимірювань, а також розрахунок параметрів анізотропії в програмі ANIZO10.

Для реалізації вимірювань магнітної сприйнятливості зразків було використано апаратуру серії KLY-2. Міст KLY вимірює так звану спрямовану повну магнітну сприйнятливості, що залежить від сприйнятливості зразка в напрямку виміру, його об'єму та фактору

розмагнічування. Зразки вимірювалися у відповідним чином обраній системі напрямків, таким чином отримано відповідно спрямовані повні магнітні сприйнятливості порід.

За результатами аналізу визначено такі параметри:

- значення магнітної сприйнятливості (χ);
- статистична величина стандартного відхилення;
- нормальні значення магнітної сприйнятливості по трьох осях;
- коефіцієнти, що характеризують магнітну анізотропію ($H_1 - H_6$);
- кут магнітного схилення (D) та кут магнітного нахилу (I).

Автори на основі вимірювань розрахували власні параметри тензора сприйнятливості (K_1, K_2, K_3), що можуть бути використані для опису магнітної природи порід.

Результати

Значення магнітної сприйнятливості зразків (рис. 1, а) загалом відрізняються несуттєво, не змінюючись у великих межах для зразків різної літології. На обмеженому діапазоні зміни магнітної сприйнятливості (без аномальних мінімальних і максимальних значень параметра) проведено уточнення статистичної мінливості параметра (рис. 1, б). На гістограмі проілюстровано ліву асиметричність значень та наявність окремої групи зразків із підвищеною магнітною сприйнятливістю.

Під час обробки отриманих магнітних параметрів було розраховано параметри магнітної анізотропії, визначення якої зумовлено розрахунками тензора сприйнятливості, системи основних сприйнятливостей і системи основних напрямків. Система напрямків завжди визначена в так званій системі координат зразка x_1, x_2, x_3 , що пов'язані з важливими напрямками в геометричній формі зразка.

На основі практичної схеми (Lanza, Meloni, 2006) автори виконали початкову класифікацію порід за формою еліпсоїду анізотропії магнітної сприйнятливості, де використані такі правила:

- форма є сферою при ($K_1 \approx K_2 \approx K_3$);
- еліпсоїд сплюснений при ($K_1 \approx K_2 > K_3$);
- форма еліпсоїду витягнута при ($K_1 > K_2 \approx K_3$);
- еліпсоїд анізотропії є тривісним при ($K_1 > K_2 > K_3$).

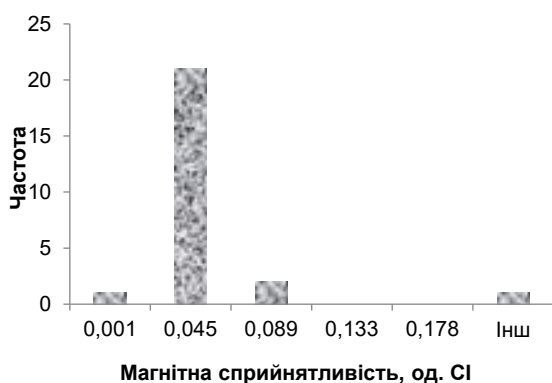


Рис. 1. Гістограма розподілення повної магнітної сприйнятливості зразків колекції:
а – повний діапазон зміни параметра; б – обмежений діапазон

У процесі аналізу розрахунків отримано чотири класи порід (рис. 2):

- тільки три зразки мають форму еліпсоїду у вигляді сфери: № 19(78), 91(84), 99(91) (3 – на рис. 2);
- еліпсоїд магнітної сприйнятливості тривісний – у шести зразків: 14(90), 20(90), 19(58), 21(67), 91(29) (2 – на рис. 2);

- форма еліпсоїду у більшості зразків (12) має сплюснений вигляд (1 – на рис. 2);

- зразки 26(02), 91(39), 92(15), 9990(131) мають складну форму еліпсоїду (4 – на рис. 2).

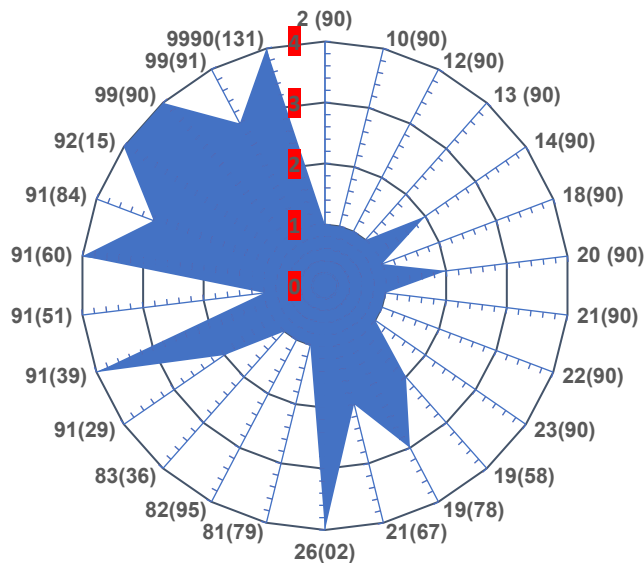


Рис. 2. Класифікація порід за формою еліпсоїду анізотропії магнітної сприйнятливості

Це говорить про складні геологічні умови, у яких утворювались породи зі свердловини "Супутник-2" Криворізької надглибокої свердловини, що за попередніми петрографічними та акустичними дослідженнями авторів підтверджується тим, що зразки належать до VII–X тектонофацій.

Запропоновано дослідження коефіцієнта інтегральної магнітної анізотропії (рис. 3), який за аналогією з акустичною анізотропією (Bezrodna et al., 2017; Продайвода та ін., 2011), розраховувався за формулою

$$A_K = \left\{ \frac{1/3[(K_1 - K_2)^2 + (K_1 - K_3)^2 + (K_2 - K_3)^2]}{(K_1)^2 + (K_2)^2 + (K_3)^2} \right\}^{1/2} 100 \%.$$

Класифікація порід за цим параметром здійснювалася таким чином: $A_K < 5 \%$ – низькоанізотропні, $5 \% < A_K < 10 \%$ – середньоанізотропні, $A_K > 10 \%$ – високоанізотропні магнітні породи.

За результатами розрахунків встановлено, що зразків з низькою магнітною анізотропією є тільки 3,8 % від усієї кількості зразків, у свою чергу, високоанізотропних зразків у складі колекції – 53,8 % від загальної кількості, що говорить про різноманітність процесів, які впливали на породи під час їх утворення.

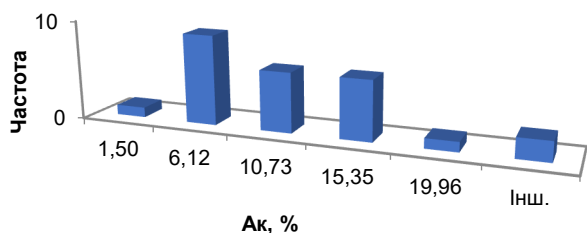


Рис. 3. Зміна коефіцієнта інтегральної магнітної анізотропії зразків

Під час попередніх досліджень було вивчено параметри акустичної анізотропії зразків свердловини "Супутник-2" (490–2720 м). У роботах авторів (Безродний, 2008; Продайвода та ін., 2011) встановлено, що для порід, які були проаналізовані, відчутна різниця у швидкостях поширення квазіпоперечних хвиль у зразках свідчить про інтенсивні процеси поляризації та розщеплення поперечних мод, що підтверджується високими рівнями тектонофацій представлених зразків. Коефіцієнт

акустичної анізотропії зразків свердловини змінюється від 2,8 до 24,9 %, симетрія акустичного тензора більшості текстур порід є ромбічною. За результатами порівняння розрахованих акустичної лінійності (L_μ) та акустичної сланцюватості (S_μ) параметри акустичного еліпсоїду тільки деяких порід мають невеликі відхилення від координатних осей, що свідчить про відсутність текстур поперечно-ізотропної симетрії.

Анізотропія акустичних властивостей є характерною ознакою гірських порід. Однак, на відміну від інших матеріалів, гірські породи мають складну неоднорідну структуру, що включає різні мінеральні асоціації, зокрема й залізисті. У численних роботах (див., наприклад, Kern, 1982; Wenk end Van Houtte, 2004; Безродний, 2008; Безродна та ін., 2017) було показано, що основними структурними факторами, які контролюють пружну анізотропію, є переважні орієнтування кристалів зерен (кристалографічна текстура), форма зерен, упорядковане їх розташування в породі (наприклад, смугастість, сланцюватість тощо), різні види тріщинуватості і мікротріщинуватості, у тому числі системи орієнтованих тріщин, витягнутих пустот тощо. Тією чи іншою мірою кожен із перелічених вище факторів окремо впливає на анізотропію пружних властивостей, тому часто неможливо зовсім безперечно встановити вплив кожного фактору.

Якщо у складі гірської породи беруть участь магнітні мінерали з вираженою кристалографічною анізотропією, то їх упорядковане розташування може створювати ефект магнітної анізотропії, яка викликана упорядкуванням:

- довгих осей феромагнітних мінералів;
- кристалографічних осей;
- доменів у багатодомених зернах;
- текстурного упорядкування, що є окремим випадком анізотропії форми.

Роль кожного з чинників у формуванні магнітної анізотропії може як завгодно варіювати, створюючи передумови для класифікації геологічних об'єктів за цією ознакою.

Безумовно, порівняння параметрів акустичної і магнітної анізотропії теоретично обґрунтовано для метаморфічних порід Криворізького регіону у зв'язку з присутністю в породах магнітних мінералів зі своїми особливостями текстури.

Підсумковим етапом у порівнянні результатів досліджень параметрів акустичної і магнітної анізотропії став тектонофаціальний аналіз отриманих даних (рис. 4).

Встановлено, що як магнітні, так і акустичні коефіцієнти анізотропії, що розраховуються з відповідних тензорів, відображають зміни тектонофаціальних умов утворення досліджених порід.

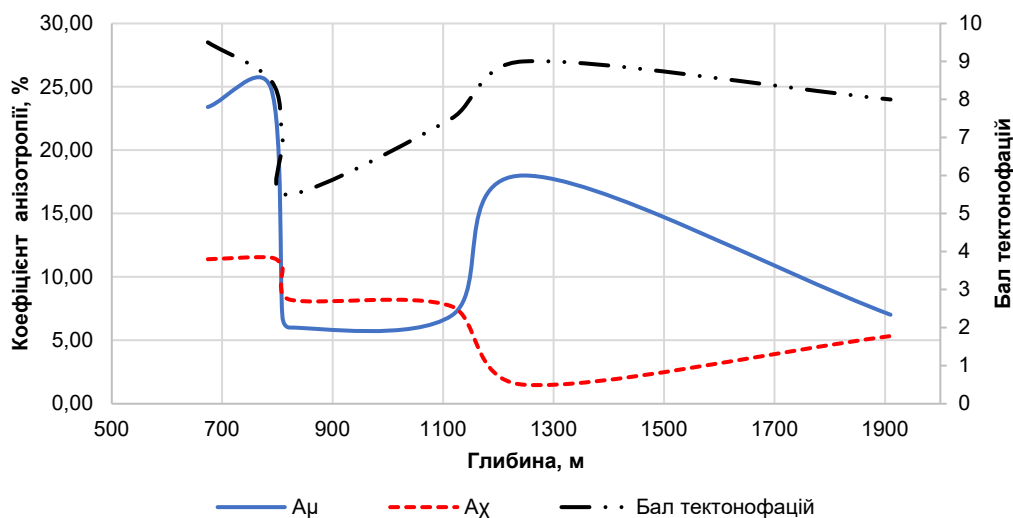


Рис. 4. Взаємозв'язок балів тектонофацій порід з магнітною і акустичною анізотропією

Висновки

Під час дослідження колекції зразків свердловини "Супутник-2" (490–2720 м) Криворізької надглибокої свердловини вивчено параметри магнітної анізотропії, які корелюються з параметрами акустичної анізотропії, встановленими авторами раніше. Дані свідчать про те, що внаслідок впливу різних тектонічних умов, зокрема мезозони і крихко-в'язкої та крихкої вторинної епізони, відбувалася зміна текстурно-структурних особливостей зразків, що вплинуло на параметри їхньої магнітної та акустичної анізотропії. Зокрема, за дослідженнями магнітної анізотропії встановлено чотири групи порід подібно до чотирьох (VII–X) акустичних тектонофацій, визначених авторами в попередніх роботах.

Проведені дослідження мають бути продовжені для встановлення більш глибоких зв'язків геологічних і фізичних факторів, що вплинули на виявлені магнітну та акустичну анізотропію зразків. Для таких досліджень необхідно вивчити зразки з наявністю високомагнітних мінералів.

Список використаних джерел

- Безродна, І., Безродний, Д., Козіонова, О. (2017). Аналіз впливу мінерального скелету порід-колекторів Руновщинської площі на пружні та акустичні параметри (за результатами математичного моделювання). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77, 52–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.06>
- Безродний, Д.А. (2008). Пружна анізотропія метаморфічних порід Кривбасу і її використання для вирішення задач тектонофаціального аналізу. *Дис. ... канд. геол. наук.* КНУ ім. Т. Шевченка.
- Гузій, М.І. (1999). Магнітна анізотропія докембрійських гранітоїдів (на прикладі Середньопридніпровського блока Українського щита). *Дис. ... канд. геол. наук.* КНУ ім. Т. Шевченка.
- Продайвода, Г.Т., Вижва, С.А., Безродний, Д.А., Безродна, І.М. (2011). Акустичний текстурний аналіз метаморфічних порід Криворіжжя. ВПЦ "Київський університет".
- Bezrodna, I.M., Vyzhva, S.A., Bezrodnyi, D.A., Popov, S.A. (2017). Comparative monitoring of parameters of the acoustic and elastic anisotropy of sandstones based on the data of laboratory ultrasonic investigations. *Матеріали XI Міжнародної конференції "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища"*, 2017, Київ.
- Kern, H. (1982). P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and

the effect of the rock micro-structure. In: W. Schreyer (Ed.), *High-Pressure Research in Geosciences*. Stuttgart.

Lanza, R., Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism. An Introduction for Geologists*. Springer-Verlag.

Stacey, F.D., Banerjee, S.K. (1974). *The Physical Principles of Rock Magnetism*. Elsevier.

Tarling, D.H., Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rock*. Chapman & Hall.

Wenk, H.-R., Van Houtte, P. (2004). *Texture and anisotrop. Rep. Prog. Phys.*

References

Bezrodna, I.M., Bezrodnyi, D.A., Kozionova, O. (2017). Analysis of mineral matrix of Runovshchinska area reservoir rocks on the elastic and acoustic parameterd (based on the results of mathematical modelling). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 52–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.06> [in Ukrainian].

Bezrodna, I.M., Vyzhva, S.A., Bezrodnyi, D.A., Popov, S.A. (2017). Comparative monitoring of parameters of the acoustic and elastic anisotropy of sandstones based on the data of laboratory ultrasonic investigations. *Матеріали XI Міжнародної конференції "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища"*.

Bezrodnyi, D.A. (2008). Elastic anisotropy of the Krivbas' metamorphic rocks and it's utilization for solving problems of the techtonofacing analysis. *Thesis ... Cand. Sci. (Geol.)*: 04.00.22. Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian].

Guzij, M.I. (1999). *Maginitna anizotropiya dokembrijskih granitoyidiv (na prikladi Serednopridniprovs'kogo bloka Ukrayinskogo shita)*. *Thesis ... Cand. Sci. (Geol.)*. Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Russian].

Kern, H. (1982). P- and S-wave velocities in crustal and mantle rocks under the simultaneous action of high confining pressure and high temperature and the effect of the rock micro-structure. In: W. Schreyer (Ed.), *High-Pressure Research in Geosciences*. Stuttgart.

Lanza, R., Meloni, A. (2006). *The Earth's Magnetism. An Introduction for Geologists*. Springer-Verlag.

Prodajvoda, G.T., Vyzhva, S.A., Bezrodnij, D.A., Bezrodna, I.M. (2011). *Akustichnij teksturnij analiz tektonofacij metamorfichnih porid Krivorizhzhya*. VPC "Kyiv. Un-t" [in Ukrainian].

Stacey, F.D., Banerjee, S.K. (1974). *The Physical Principles of Rock Magnetism*. Elsevier.

Tarling, D.H., Hrouda, F. (1993). *The Magnetic Anisotropy of Rock*. London: Chapman & Hall.

Wenk, H.-R., Van Houtte, P. (2004). *Texture and anisotrop. Rep. Prog. Phys.*

Отримано редакцією журналу / Received: 21.04.23

Прорецензовано / Revised: 01.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Iryna BEZRODNA, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-6835-5276
e-mail: bezin3@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
Dmytro BEZRODNY, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
e-mail: manific2@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF MAGNETIC ANISOTROPY OF ROCK SAMPLES FROM THE POLIGON OF THE KRIVORIZKA EXTREMELY DEEP WELL

Understanding the reasons and principles of anisotropy of geological rocks opens the way to assess geodynamic processes in regions, enables to track changes of geological factors that form them, provides information about the structure and directions of the dynamics of geological rocks and etc.

The aim of this study is the investigation of the nature of magnetic anisotropy of a collection of 26 samples that were taken from the well "Suputnyk-2" (490–2720 m) of the Kryvorizka extremely deep well. The samples consist of the following rocks: biotite schists, gneisses, ferruginous quartzites, muscovite quartzites, microcline-plagioclase granites. The authors used equipment of the KLY-2 series to measure the magnetic susceptibility of samples having the shape of cuberhombic decahedron. The authors have performed primary processing of measurement results and calculation of anisotropy parameters in the ANIZO10 program.

The following parameters were determined as a result of the analysis: value of magnetic susceptibility (χ); statistical value of the standard deviation; normal values of magnetic susceptibility along three axes; coefficients characterizing magnetic anisotropy ($H_1 - H_6$); magnetic inclination angle (D) and magnetic inclination angle (I).

The authors performed an initial classification of rocks based on the practical data processing scheme. Analyzing the calculations based on the ellipsoid of magnetic susceptibility, four rock classes were obtained: the shape of a sphere (12 %), a flattened shape (46 %), triaxial (23 %) and a complex ellipsoid shape (19 %). This indicates the complex geological conditions where rocks from the well "Suputnyk-2" (490–2720 m) were formed. It is confirmed that the samples belong to the VII–X tectonofacies according to the authors' previous research.

The authors have investigated the coefficient of differential magnetic anisotropy, such as acoustic anisotropy. According to the results of the calculations, it was established that samples with low magnetic anisotropy are only 3.8 % of the total number of samples. Highly anisotropic samples of the collection comprise 53.8 % of the total number. It indicates the variety of processes that affected the rocks during their formation.

According to the previous research of the authors, the coefficient of acoustic anisotropy of the well samples also varies from 2.8 to 24.9 %. The symmetry of the acoustic tensor in the majority of rock textures is rhombic.

The final step in comparing the research results of the parameters of acoustic and magnetic anisotropy involved a tectonofacial analysis of the obtained data. It was determined that both magnetic and acoustic anisotropy coefficients, calculated from their respective tensors, reflect changes in tectonofacial conditions during the formation of the studied rocks.

Key words: *magnetic anisotropy, cuberhombic decahedron, classification, acoustic and anisotropy.*

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 550.83

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.05>

Aigerim TLEUBERGENOVA¹, Doctoral Student
ORCID ID: 0000-0003-0483-2798
e-mail: abdullinakrg@gmail.com

Guلزada UMIROVA^{1,2}, PhD, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0001-5185-3132
e-mail: umirova.gulzada@gmail.com

Aliya MAUSSYMBAYEVA¹, PhD, Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-7214-8026
e-mail: aliya_maussym@mail.ru

Vasiliy PORTNOV¹, DSc (Phys. & Math.), Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4940-3156
e-mail: vs_portnov@mail.ru

¹Karaganda Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

²Kazakh National Research Technical University, Almaty, Republic of Kazakhstan

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF MAGNETIC AND GRAVITY DATA BASED ON VOLUMETRIC GRAVITY-MAGNETIC MODELING ALONG THE GEOTRAVERSE IN THE SHU-SARYSU SEDIMENTARY BASIN

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

The purpose of the studies presented in the article is to obtain the information of the deep structures along the Shu-Sarysu geotraverse, to determine the regularities in the distribution of mineral deposits and predictive assessment of the research area prospects for searching for hydrocarbons and other minerals. To achieve this purpose, a complex of high-precision gravitational and magnetometric measurements was used. There was shown a high efficiency of the integrated interpretation of 3D gravimagnetic modeling when studying the geological structure of the crystalline basement (assessment of the morphology of its surface, material-petrophysical mapping of the rocks that make up the basement) and the sedimentary cover (assessment of the morphology of the reference horizons, studying their material composition); when identifying and clarifying the position of discontinuous faults, conducting lineament analysis in order to decipher the block structure of the studied areas; when building 3D volumetric models of geophysical parameters; when substantiating predictive and search geophysical criteria for detecting oil and gas geological structures, both in the thickness of sedimentary formations and in the rocks of the crystalline basement. The progress of these methods is conditioned by the widespread introduction into practice of modern computer technologies for processing and interpreting data.

Key words: geotraverse, gravity data, aeromagnetic, density properties of rocks, geomagnetic model, field transformations, gas, 3D modeling of potential fields.

Background

The results of a systematic study by a complex of geological and geophysical methods in combination with regional studies have always served as the basis for the development of many topical problems of formation, localization of various industrial-genetic types of deposits and reassessment of prospects for mineral deposits at a new level. A large radius of study characterizes geophysical methods, and the main result of their application is three-dimensional representations of the earth's crust structure with its differentiation according to certain physical parameters: density, magnetic and electrical properties, velocity of elastic vibration propagation, etc. The use of geophysics leads to reducing the cost of the work. However, the use of one method does not provide an unambiguous solution to the tasks set, therefore, in order to achieve the goals, it is necessary to develop and to improve the complex of geophysical methods. As a result, a modern geophysical basis is formed that is obtained with high-tech and high-precision equipment and advanced software, which is the basis for building high-quality geological models of mineral deposits. The study area belongs to the little-studied, almost completely closed areas. As a result of the development of the geological exploration program for sedimentary basins, it was decided to study the Shu-Sarysu sedimentary basin by carrying out works along the Shu-Sarysu geotraverse.

According to the results of more than 40 years of exploration history, the Shu-Sarysu basin has a very complex geological structure, a tense geodynamic history, and the degree of geological and geophysical exploration of the basin does not allow assessing reasonably its

generation potential in relation to hydrocarbons (Daukeev et al, 2002). All these data substantiate a complex of geophysical surveys along the Shu-Sarysu geotraverse. The proximity of the Shu-Sarysu basin to a number of large cities and industrial centers of Central and Southern Kazakhstan will make it an ideal source of Kazakhstan gas supply if sufficient reserves are discovered. Finally, according to the statistical calculations of specialists, the potential of the Shu-Sarysu basin is quite high. However, their reliability requires confirmation through a significant amount of complex geophysical work with the delineation of local objects and setting oil and gas prospecting drilling within them. All these facts substantiate the relevance of the studies presented in the article.

The information of studying the geological and tectonic structure, prospects for gas content along the Shu-Sarysu geotraverse, as well as the possibilities of modern aeromagnetic exploration and the range of geological tasks to be solved during regional work were considered in the article "Goelectrical model of the Earth's crust along the Shu-Sarysu geotraverse according to magnetotelluric soundings" (Tleubergenova et al., 2023).

The purpose of this work is to study the deep structure of the basin, to identify structural and material complexes in the sedimentary cover and to assess the regional hydrocarbon potential of the territory based on the interpretation of gravimagnetic data using modern technologies of 3D modeling of potential fields.

The scientific significance of the presented studies is substantiated by the development of a modern three-dimensional geophysical model of the area, which makes it

© Tleubergenova Aigerim, Umirova Gulzada, Maussymbayeva Aliya, Portnov Vasiliy, 2023

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

possible to clarify the geological structure of the Shu-Sarysu sedimentary basin, to change ideas of the tectonic activity of rocks and to find out the conditions for the formation of hydrocarbon deposits.

The practical significance lies in the use of complex 3D modeling technology for various regions, which makes it possible to compare models obtained at the early stages of research; building complex geodensity and geomagnetic models of the earth's crust on specific reference profiles; the possibility of regional forecasting of areas favorable for the accumulation of hydrocarbons in the redistribution of sedimentary basins and solid minerals within ancient platforms (Galuev, 2008).

The set goals were achieved through the solution of the following tasks:

- generalizing and integrating geological and geophysical criteria based on the features of the Shu-Sarysu sedimentary basin geological structure for a comprehensive interpretation of gravity and magnetic anomalies;
- studying the characteristic behavior of the gravitational field in order to separate the gravitational effects from various geological structures occurring in depth;
- identifying intrusive bodies lying at depth, tracing numerous faults using lineament analysis based on geodensity and geomagnetic models;
- predictive assessing the geological structures for prospects for hydrocarbons.

A full range of geophysics was performed on the Shu-Sarysu geotraverse, but this article shows a comprehensive analysis of magnetic and gravity data based on the results of the volumetric gravimagnetic modeling, since it is three-dimensional geological models that integrate all geological and geophysical information. The contours of the main elements of the structural-tectonic structure of the area obtained on the basis of generalizing stock materials of previously performed geological and geophysical studies are plotted on maps of horizontal sections of excess density and magnetization.

Materials and research methods. Here there is a brief description of the results of aeromagnetic reconnaissance. The observed magnetic field is associated with magnetization of the crystalline basement rocks of predominantly basic and ultramafic composition, and sedimentary rocks, as a rule, do not contain magnetized rocks in their composition (Tleubergenova et al., 2023).

The qualitative interpretation of the magnetic field is based on the following basic principles for interpreting magnetic anomalies:

- the areas of positive magnetic field are caused by magnetic basement rocks (Cambrian porphyrites) and large intrusions of medium-acidic composition;
- the Upper Ordovician granodiorites and diorites, as well as the Devonian volcanics, have anomalously high values of magnetic susceptibility and are characterized by positive magnetic anomalies with intensity up to 600–700 nT;
- the group of weakly magnetic granitoids and sedimentary-metamorphic rocks is marked by low magnetic fields with an intensity of 100–200 nT;
- the mosaic structure of the magnetic field corresponds to the vaults of structural elements with a shallow foundation;
- deep depressions are reflected in the magnetic field as low-gradient isometric anomalies;
- tectonic disturbances are expressed by zones of high magnetic field gradient. Deep basement faults that control the placement of structures in the sedimentary cover are characterized by linear chains of anomalies.

It is noted that under the platform conditions, the structures of the sedimentary cover correspond to the relief of the basement, therefore, it follows that by studying the structure of the basement by magnetic prospecting, it is possible to identify objects promising for oil and gas in the sedimentary cover.

As a result of the aeromagnetic survey we:

- characterized the relief of the Paleozoic base;
- identified intrusive bodies of different sizes and composition;
- traced tectonic faults. The most important deep faults include the Tastin and the Shusky ones that separate the Tasbulak trough from the Tastin uplift, the Tastin uplift from the Nizhne-Shu uplift and the Sozak-Baikadam trough;
- according to the characteristics of the magnetic field, the zoning of the territory was carried out;
- a buried part of the North Karatau anticlinorium was traced, and under the Syrdarya syncline a continuation of the Turlan brachysynclinal structure was found;
- the fold-block nature of the structures of the region, as well as the stepped structure of the basement surface, was confirmed;
- within the Leontief graben, where droplet oil was discovered in 2017, there is a linear decrease in the magnetic field values from plus 50 nT to minus 150 nT;
- identified local structures that are of interest for searching for a whole range of minerals (Tleubergenova et al., 2023).

The results of gravimetric studies carried out in potentially oil and gas areas testify to the high efficiency of using gravity exploration together with seismic exploration and other methods of geophysics in studying sedimentary basins, solving problems of petroleum geology at the regional-zonal and local level (Babayanc et al., 2003). The structural-tectonic structure of the sedimentary cover, the morphology of the basement surface are very clearly and reliably manifested in the gravitational field. Modern technologies of analyzing gravity measurements make it possible to identify new elements of the structural-tectonic structure, to supplement significantly the interpretation of seismic data, to expand existing ideas of the region geological structure features, to help clarify the structural position of areas, and to increase reliability of predictive estimates (Babayanc et al., 2004).

The gravimeters CG-6 AutoGrav Scintrex (Canada) were used during field gravity exploration along the Shu-Sarysu geotraverse. They are by far the most advanced instruments in the world for high-precision ground gravity surveys (Nazirova et al., 2019). In order to bring the gravimetric survey to the level of the State gravimetric network, as well as to take into account the offset of the zero point of the instruments in ordinary cruises, 4 points of the field reference gravimetric network were used. Ordinary gravimetric measurements were carried out according to a single method, flights began and ended at field strongholds.

The root-mean-square error in determining the observed values of gravity was ± 0.02 mGal, the gravity anomalies in the Bouguer reduction were ± 0.02 mGal.

The office processing of gravity data was performed using the Gravity and Terrain Correction module of the Geosoft Oasis Montaj™ software package. The system includes all the functions of processing and reduction of gravity survey data, including the input of corrections for relief using digital elevation models (Nazirova et al., 2016).

Based on the obtained materials, a digital model of the gravity field of 100 km of the Shu-Sarysu regional profile strip and its framing along a 500x500 m network was developed. Processing, interpretation and conditional visualization of

gravity data were performed using modern specialized software packages: the ArcGIS/ArcMap (ESRI, USA), the Didger (Golden Software, USA), the Surfer (Golden Software, USA), the Geosoft Oasis MontajTM, COSCAD 3D, the SIGMA-3D, the GM-SYS 2D, the ZONDGM2D.

The analysis of a priori information collected from the experience of geophysical research and the results of the geological interpretation of the gravity field in the region made it possible to form the following geological and geophysical criteria.

1. The gravity minima can be caused by deflections in the roof of the ancient folded basement made by thick strata of the platform cover and an intermediate structural stage, in the section of which low-density salt-bearing formations are likely.

2. The local gravity minima and maxima can be caused respectively by salt domes and local uplifts of dense rocks (P_1 , C_{1v} , C_{1t} , D_{3fm}).

3. The gravity maxima are usually associated with uplifted blocks of the ancient basement, which are characterized by a reduced thickness of the intermediate structural stage, loss of some strata, including salt-bearing ones, from the section of the latter.

4. The anomaly-forming gravity field objects are the Middle Carboniferous, the Middle-Late Devonian, the Middle Devonian intrusive complexes. Basic and ultrabasic intrusions cause contrasting positive anomalies. Medium composition objects (diorites, granodiorites) are characterized by an increased gravity field. Acid intrusions are displayed in the gravity field as negative anomalies.

5. Tectonic disturbances are expressed by zones of a high gradient of the gravitational field. Correlating bends of isoanomalies, a sharp change in the strike of anomalies and linear boundaries of changing the nature of the field can correspond to them. On the map of local anomalies, they are fixed by steps of high gradients; on the map of the vertical gradient of gravity anomalies by chains of isolated, linearly elongated small negative anomalies stretching from the northwest to the southeast.

Results and discussion

To analyze the gravitational field, a map of gravity anomalies in the Bouguer reduction was used. The initial field (fig. 1,a) reflects the total gravitational influence of both the geological structures of the upper tiers (fig. 1,b) and the deep structures of the earth's crust and upper mantle. To separate gravitational effects from surface and deep structures, regional and residual gravity anomalies are calculated by means of recalculating the initial field into the upper half-space at different heights.

The observed gravitational field of the region is difficult to differentiate; its intensity varies from minus 215 mGal to plus 20 mGal. In the regional component, the range of anomaly intensity values is from minus 150 mGal to minus 15 mGal.

Decreasing of the intensity of the field from the northwest to the southeast characterizes the strike of structural elements in the regional plan. The complex nature of the gravity field of the region is caused by significant variations in the thickness of the sedimentary cover, presumably due to the density heterogeneity of the basement of the considered parts of the Shu-Sarysu sedimentary basin. The main largest and most distinct elements of the gravity field (from north to south along the geotraverse) are the Shu block, the Tasbulak trough, the Lower Shu uplift, the Tastin uplift, the Talas uplifted block, the Sozak-Baikadam trough, the Moynkum trough, the Leontief graben, the Karatau ridge and the Arys trough (the latter is part of the Syrdarya basin).

Based on the gravi-magnetic data, the transformants were calculated and a three-dimensional geodensity

model (fig. 2) and a magnetic magnetization model were built, which made it possible to interpret gravity and magnetic field anomalies along the entire Shu-Sarysu geotraverse strip.

A decisive role in the region structure is played by the Main Karatau Fault (MKF), the longest one, established according to geological data and well traced in physical fields along the gradient zones and a sharp change in the direction of isoanomalies. This Precambrian fault is a complex system of subparallel faults, which in all geological epochs served as a supply channel for magma and hydrothermal solutions. The MKF displacement plane has a southwest dip at an angle of 80° , the maximum amplitude is 1.5–2.0 km (Akchulakov et al., 2014).

The northern end of the Shu-Sarysu regional profile extends beyond the boundaries of the sedimentary basin and is limited by the Shu block.

The residual field calculated as the difference between the initial and recalculated upwards to the height of 15 km, is characterized by a strong irregularity of isoanomalies and reflects the structure of the upper tiers of the distinguished structures (fig. 3,a). Residual gravity anomalies are compared with the magnetic field normalized to the pole (fig. 3,b).

The use of the procedure makes it possible to carry out the automatic tracing of linearly elongated anomalous zones, to identify the epicenters of local anomalies, and to designate their axial lines. The obtained solution testifies to the high efficiency of this algorithm for detecting lineaments practically regardless of the intensity of anomalous manifestations in the initial field (fig. 4 and 5) (Bezukladnov et al., 2007).

The carried out gravimetric studies confirmed large blocks of the earth's crust, contoured the distribution areas of rocks of different composition, revealed intrusive bodies lying at depth, traced numerous faults of various directions, lengths and depths.

Based on the conducted gravity survey in the 100 km strip of the Shu-Sarysu regional profile:

- the block nature of the foundation structure was confirmed;
- the explanation of the gravitational effect within the limits of the Tastin and Nizhne-Shu uplifts, the Tasbulak and Moynkum troughs was given;
- the development of anticlines and horsts with an increased thickness of the Carboniferous limestones and intrusive bodies of basic and felsic composition on the Tastin uplift was predicted.

Conclusions

The gravimetric work allowed obtaining additional information of the geological and tectonic structure of the almost completely closed region. Large blocks of the earth's crust differing in the history of development and geological structure were identified, the areas of distribution of rocks of different compositions, intrusive bodies occurring at depth were outlined. Local uplifts in the roof of the Paleozoic and its individual horizons were identified. Numerous discontinuous disturbances of various directions, lengths, depths and various roles in the formation of the structural plan of the region were traced.

As a result of gravity exploration in the 100-kilometer corridor of the Shu-Sarysu regional profile, the following conclusions were made:

1. The existing views on the block nature of the region structures that differ in the depth of the foundation, were confirmed.

The intense indentation of the gravity field, a lot of correlated bends of isoanomalies carry the information of the block

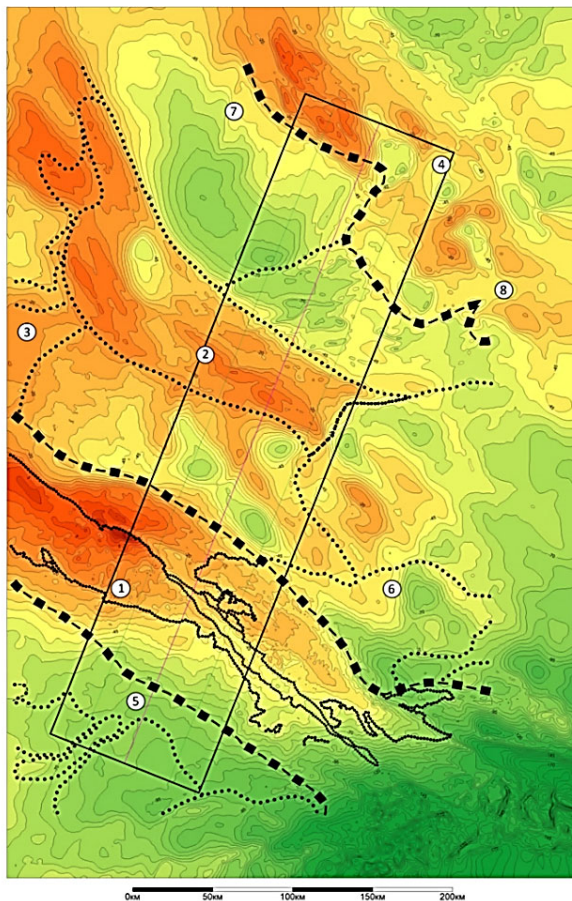
structure of the brachisynclinatorium and trough submerged part. The blocks are bounded by small rapidly wedged-out faults of predominantly submeridional and northeast strike that feature extended faults of the northwest direction.

2. In the Tasbulak and Moynkum troughs and within the areas of the Tastin and Nizhne-Shu uplifts, the gravitational effect uncompensated by the sedimentary cover is explained by the probable presence of lenticular layers of the Upper Devonian rock salt and acidic intrusions in the basement (in some areas, their total influence).

The development of anticlines and horsts with an increased thickness of the Carboniferous limestones and intrusive bodies of basic and felsic composition is expected on the Tastin uplift.

3. The Baikadam, the Kokshui, the Shabdan and the Moynkum troughs can be of interest in the search for oil and gas.

Minor anticlinal structures and uplifts in the section of the cover can be of interest for exploration. All the presented figures serve as an illustration of the spatial confinement of the gas fields of the Shu-Sarysu sedimentary basin to local positive gravity anomalies.



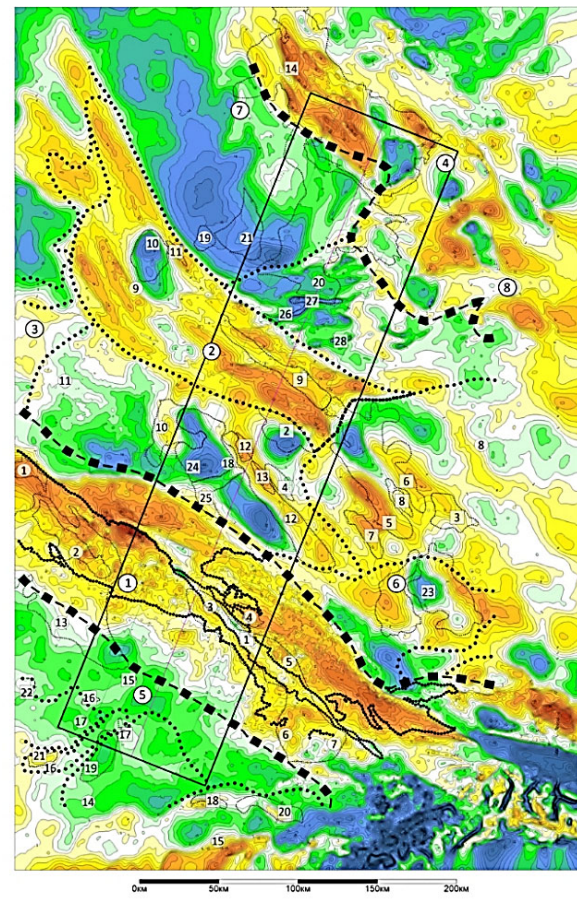
Designations

- Sedimentary basin boundaries
- Regional structural elements boundaries
- Higher order structural elements boundaries

Regional structures ①

- 1 – Karatau
- 2 – Talas-Tasta uplift
- 3 – Sozak-Baikadam trough
- 4 – Shu block
- 5 – Syrdarya geoblock
- 6 – Kyzylkiin geoblock
- 7 – Tasbulak trough
- 8 – Nizhne-Shu uplift

a



2nd order structures ①

- 1 – North Karatau anticlinorium
- 2 – North Karatau synclinatorium
- 3 – Turlan brachisynclinatorium
- 4 – Kokzhot anticlinorium
- 5 – Boroldai brachisynclinatorium
- 6 – Tyulkubas brachisynclinatorium
- 7 – Dzhababagly anticlinorium
- 8 – Moynkum trough
- 9 – Tastin uplift
- 10 – Ozhirai-Tube uplift
- 11 – Sozak trough
- 12 – Sarykemer rampart
- 13 – Karatau slope
- 14 – Arys trough
- 15 – Shulak (Shulin) uplift
- 16 – Boltakol-Bosaga rampart
- 17 – Shaulder trough
- 18 – Baidakam trough
- 19 – Byurtusen depression
- 20 – Koskuduk depression
- 21 – Isykyr rampart

Higher order structures ①

- 1 – Leontief graben
- 2 – Shabdan mould
- 3 – Moynkum mould
- 4 – Zhana-Arys uplift
- 5 – Toguzken uplift
- 6 – Koskuduk uplift
- 7 – Magbal ledge
- 8 – Zhamkeles- Akzhan trough
- 9 – Arandy uplift
- 10 – Kyzyshekh graben-syncline
- 11 – Uvanas horst
- 12 – Sandy local structure
- 13 – Orkazgan uplift (rampart)
- 14 – Zhuantobe anticlinorium
- 15 – Arystandy uplift
- 16 – Timur uplift
- 17 – Akozek uplift
- 18 – Kabulsai trough
- 19 – Kungur trough
- 20 – Lenger-Urtabas rampart
- 21 – Asarchi uplift
- 22 – Aidar rampart
- 23 – Dazhailau intrusion
- 24 – Kokshu mould
- 25 – Kanzhugan rampart
- 26 – Tantai salt structure
- 27 – Kazangap salt structure
- 28 – Bestobe salt structure

b

Fig. 1. Gravity survey results:

a – map of gravity anomalies in the Bouguer reduction;

b – local component of gravity anomalies in terms of the upper half-space at 15 km

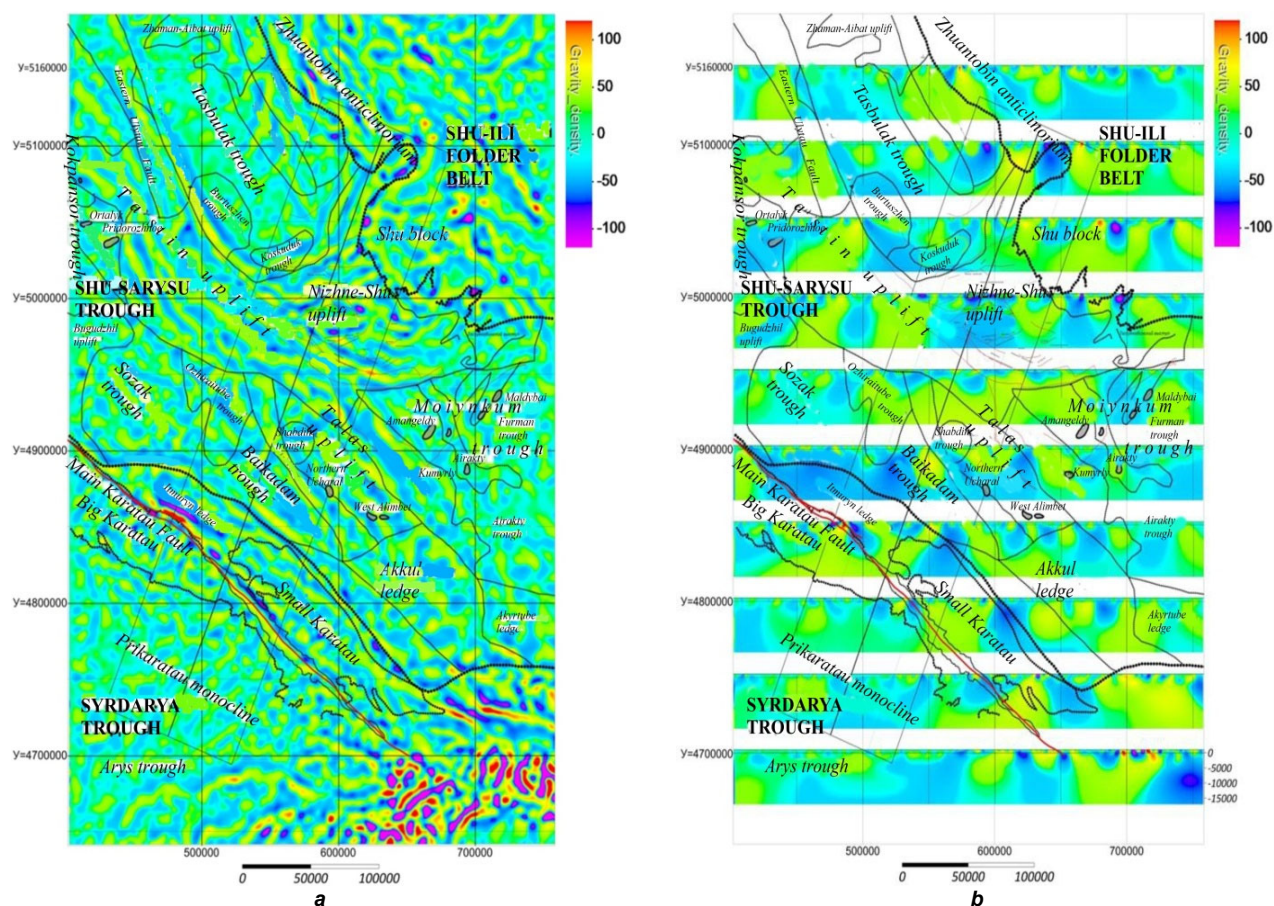


Fig. 2. Horizontal section at the depth of 2 km (a) and vertical latitudinal sections of the volumetric density model down to the depth of 17 km (b)

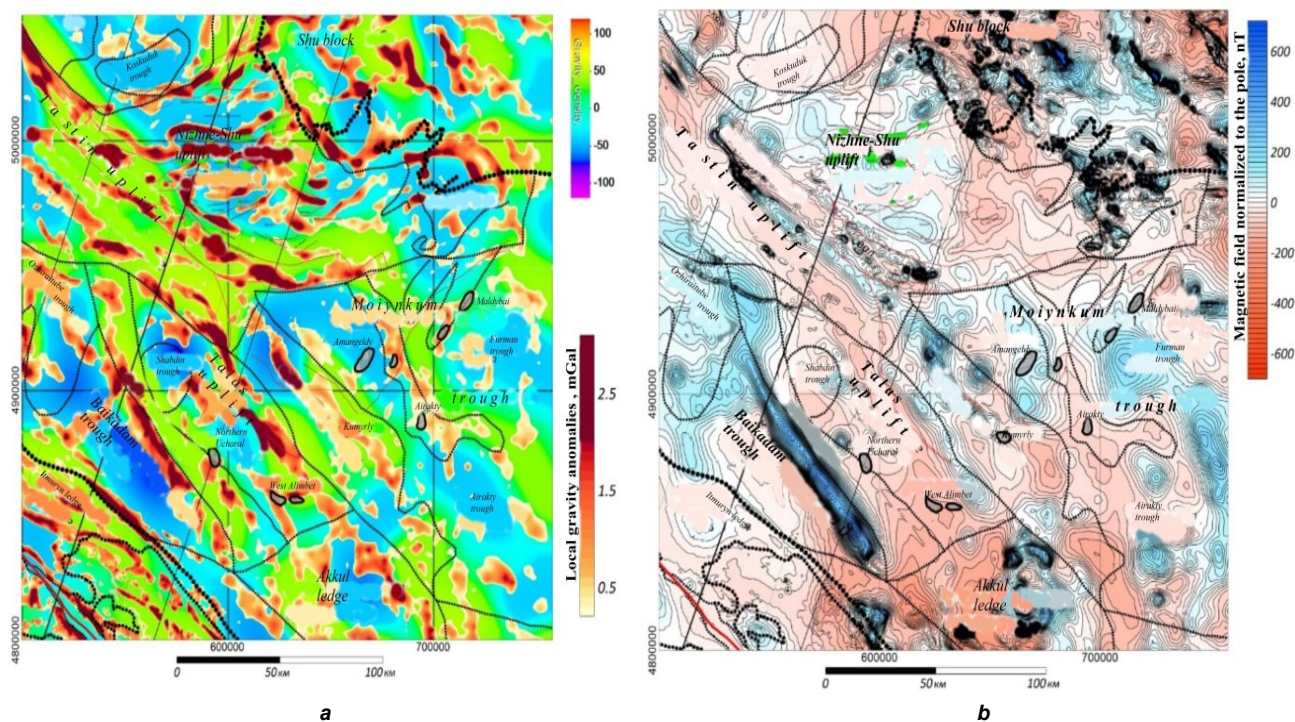


Fig. 3. Residual gravity anomalies (REIST model) against the background of a horizontal slice of a 3D model of excess density at the depth of 15 km (a) in comparison with the magnetic field normalized to the pole (b)

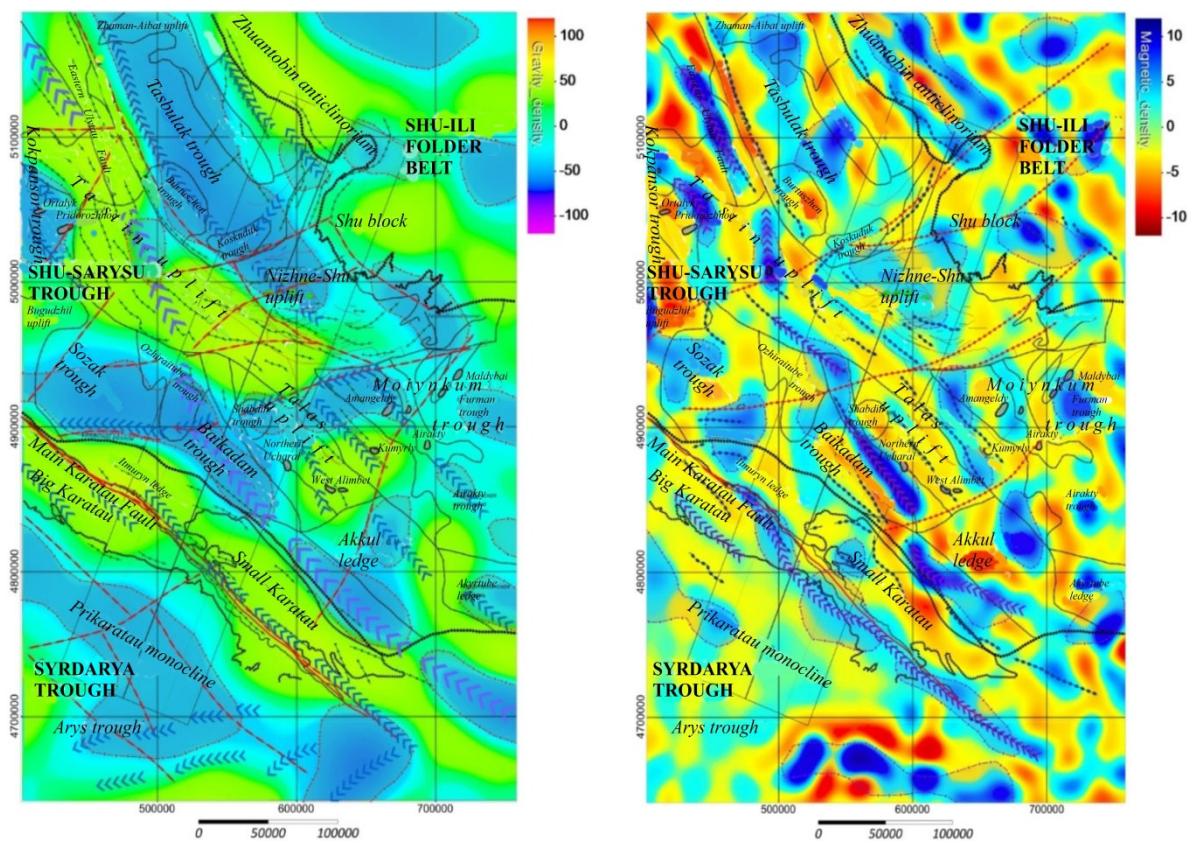


Fig. 4. Schemes of lineaments against the background of a horizontal cut to the depth of 7 km geodensity (a) and geomagnetic (b) models

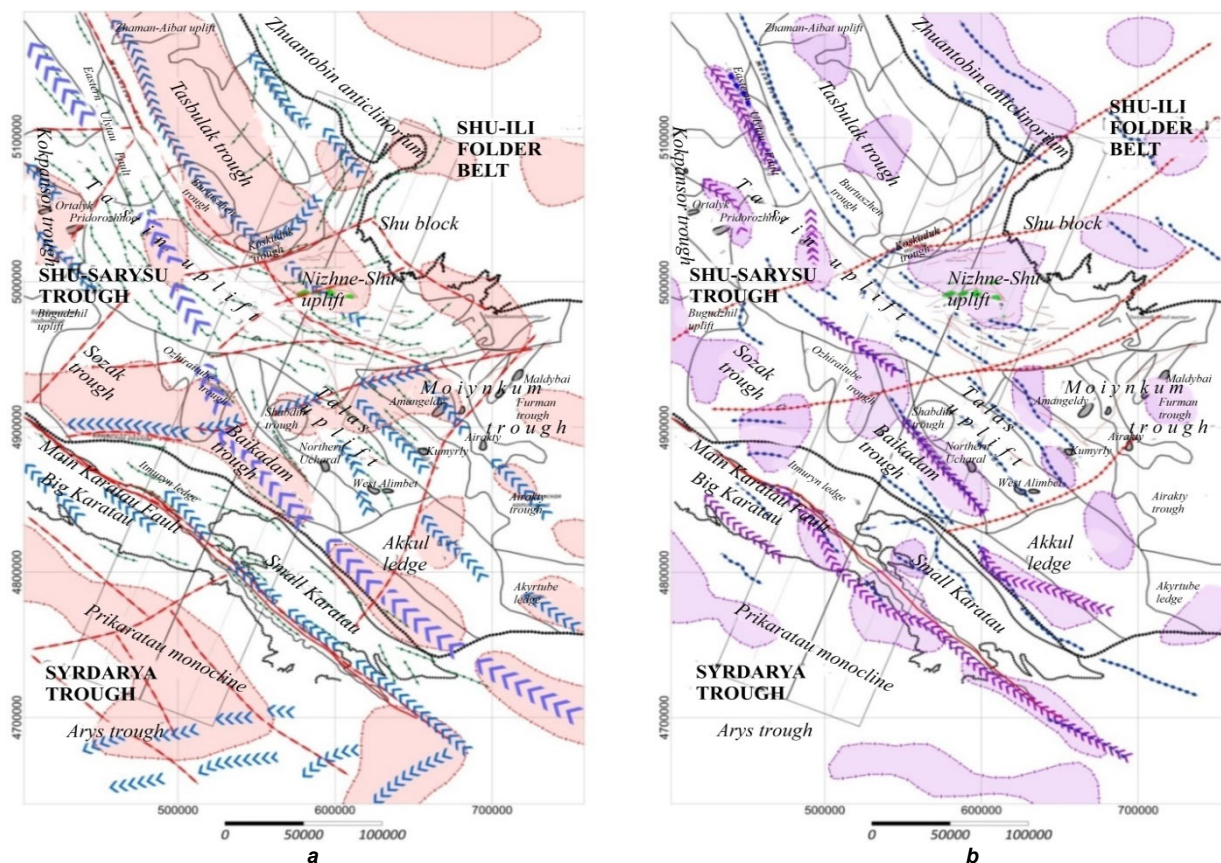
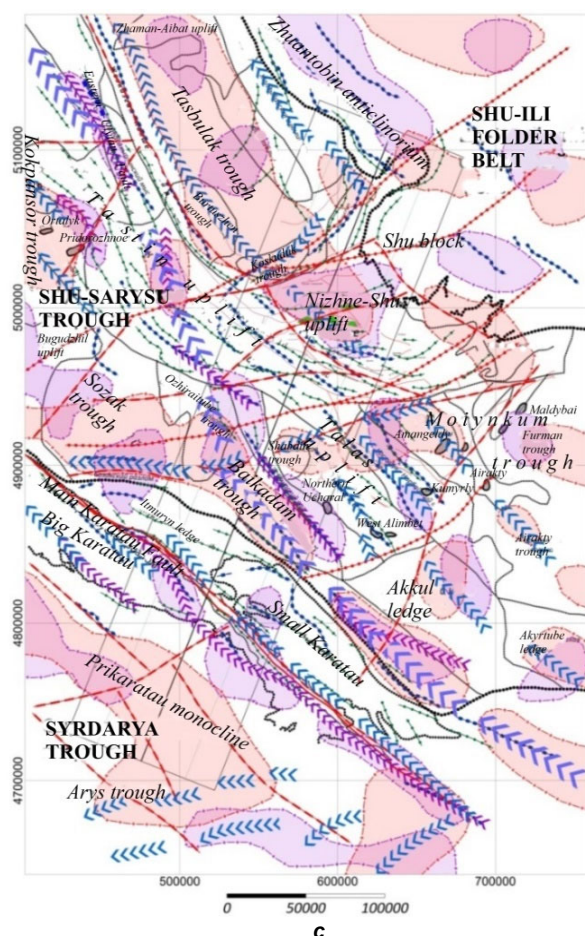


Fig. 5. Elements of interpretation schemes for the density (a) and magnetic (b) models and their comparison (c)



Designations to schemes of gravi-magnetic model interpretation

- generalized contour of the Shu-Sarysu sedimentary basin
- boundaries and names of structural tectonic elements
- gas deposits
- salt-dome structures
- the axis line of the regional reference profile
- external boundary of 100 km geotraverse strip
- boundary of 60 km geotraverse strip

3D density model elements:

- negative density anomalies contours at the 15-20 km depth equated to the granitoid intrusive massifs
- axes of positive linear anomalies at the 2-3 km depth equated to the anticlinal folds, ramparts of the Upper Paleozoic formations
- axes of negative anomalies at the 7-10 km depth equated to the maximum trough depths of the quasi-platform tier of the Upper Paleozoic age
- axes of negative anomalies chains at the 10-15 km depth
- axes of the disturbance zone of the density anomalies correlation at the 3-5 km depths equated to tectonic violations in the quasi-platform tier stratum of the Upper Paleozoic

3D magnetization model elements:

- magnetization positive anomalies contours at the 10 km depth equated to the intrusive massifs of the medium composition
- axes of positive linear anomalies at the 2-3 km depths
- axes of magnetization positive chains at the 10 km depth, magnetic anomalies trend
- axes of the disturbance zone of the magnetization anomalies correlation at the 5-7 km depths

Fig. 5. (ending) Elements of interpretation schemes for the density (a) and magnetic (b) models and their comparison (c)

References

- Akchulakov, U., Zholtaev, G.G., Kuandykov, B.M., Iskaziev, K. (2014). Atlas of oil and gas bearing and prospective sedimentary basins of the Republic of Kazakhstan.
- Babayanc, P.S., Blokh, Yu.I., Trusov, A.A. (2004). Possibilities of structural-material mapping according to magnetic and gravity survey data in the SIGMA-ZB software package. *Geofizicheskij vestnik*, 3, 11–15.
- Babayanc, P.S., Blokh, Yu.I., Trusov, A.A. (2003). Study of the relief of the crystalline basement of platform areas based on magnetic and gravity survey data. *Geophysics*, 6, 55–58.
- Bezukladnov, V.A., Kalinin, D.F., Kalinina, T.B. (2007). Technique for constructing and using three-dimensional stochastic FGM objects of different ranks in solving problems of geological and geophysical forecasting. *Geophysics*, 5, 55–61.
- Daukeev, S.Zh., Vocalevskij, E.S., Paragulkov, Ch.Ch., Shlygin, D.A., Pilifosov, V.M., Kolomic, V.P., Komarov, V.P. (2002). Deep structure and mineral resources of Kazakhstan. Vol. 3. Oil and gas.

Galuev, V.I. (2008). Geophysical models of the earth's crust based on a fragment of the reference profile 1-SB. *Geophysics*, 5, 33–40.

Nazirova, A.B., Abdoldina, F.N., Aymahanov, M., Umirova, G.K., Muhamedyev, R.I. (2016). An automated system for gravimetric monitoring of oil and gas deposits. *14th International Conference on Digital Transformation and Global Society*, 585–595.

Nazirova, A.B., Abdoldina, F.N., Dubovenko, Y.I., Umirova, G.K. (2019). Development of GIS subsystems for gravity monitoring data analysis of the subsoil conditions for oil and gas fields. *18th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 1–5.

Tleubergenova, A.K., Umirova, G.K., Karpenko, A.N., Maussymbayeva, A.D. (2023). Geoelectrical model of the Earth's crust along the Shu-Sarysu geotraverse according to magnetotelluric soundings. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 5–10.

Отримано редакцією журналу / Received: 21.04.23

Прорецензовано / Revised: 16.05.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Айгерим ТЛЕУБЕРГЕНОВА¹, докторант
ORCID ID: 0000-0003-0483-2798
e-mail: abdullinakrg@gmail.com

Гульзада УМІРОВА^{1,2}, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0001-5185-3132
e-mail: umirova.gulzada@gmail.com

Алія МАУСИМБАЄВА¹, канд. геол. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-7214-8026
e-mail: aliya_maussym@mail.ru

Василій ПОРТНОВ¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0002-4940-3156
e-mail: vs_portnov@mail.ru

¹Карагандинський технічний університет, Караганда, Республіка Казахстан

²Казахський національний дослідницький технічний університет, Алмати, Республіка Казахстан

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ДАНИХ МАГНІТОРОЗВІДКИ ТА ГРАВІРОЗВІДКИ НА ОСНОВІ ОБ'ЄМНОГО ГРАВІМАГНІТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВЗДОВЖ ГЕОТРАВЕРСА ШУ-САРИСУ

Метою представлених досліджень є отримання інформації про глибинну будову геологічних структур уздовж геотраверса Шу-Сарису; з'ясування закономірностей розташування родовищ корисних копалин і прогнозна оцінка перспективності території досліджень на пошуку вуглеводнів та інших корисних копалин. Для досягнення цієї мети застосовувався комплекс високоточних гравітаційних і магнітометричних вимірів. Показано високу ефективність комплексної інтерпретації гравімагнітного 3D-моделювання щодо геологічної будови кристалічного фундаменту (оцінка морфології його поверхні, речовинно-петрофізичне картування порід фундаменту) та осадового чохла (оцінка морфології опорних горизонтів, вивчення їх речовинного складу); при виявленні та уточненні положення розривних порушень, проведенні лінеamentного аналізу з метою розшифрування блокової будови площ, що вивчаються; під час побудови об'ємних 3D-моделей геофізичних параметрів; обґрунтуванні прогнозно-пошукових геофізичних критеріїв виявлення нафтогазових геологічних структур як у товщі осадових утворень, так і в породах кристалічного фундаменту. Прогрес зазначених методів зумовлений широким впровадженням у практику сучасних комп'ютерних технологій обробки та інтерпретації даних.

Ключові слова: геотраверс, гравірозвідка, аеромагніторозвідка, щільнісні властивості гірських порід, геомагнітна модель, трансформації поля, газ, 3D-моделювання потенційних полів.

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.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

UDC 553.042:553.43

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.06>

Mamoy MANSUROV, PhD (Geol. & Mineral.), Assoc. Prof.

ORCID ID: 0000-0001-8673-3034

e-mail: mamoy_mansurov@mail.ru

Baku State University, Baku, Republic of Azerbaijan

**GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE MAIN ORE COMPONENTS
IN THE GOSHGARCHAY PORPHYRY-EPITHERMAL SYSTEM
(LESSER CAUCASUS, AZERBAIJAN)***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)*

The article deals with the determining characteristics of ore elements in the Goshgarchay porphyry-epithermal system. The genetic and geochemical characteristics of the main ore components were studied, and close positive and negative relationships between pairs of elements were determined by correlation analysis on the selected elements. According to the results of the cluster analysis, the geochemical associations that allow the localization of the development area of mineralization at different stages of formation of the porphyry-epithermal system were analyzed. The following series of stable elements, which are typical for hydrothermal deposits, are distinguished among the ore elements of the host and ore-bearing intrusive rocks: Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Ti, Cr, V, Sr, etc. This group of elements is considered to be the indicator elements of the copper-porphyry deposit within the porphyry-epithermal system. It has been determined that correlations between elements in copper-porphyry mineralization are characterized by a wide range of element impurities. It includes both chalcophile (As, Sb, Cu, Bi, Cd, Ga, In, Ge, Au, Ag, Te) and siderophile (Co, Ni, Mo, Fe, Cr) elements. The range of values of vertical geochemical zonality on individual sections of the deposit allows to assess the level of the erosion truncation of occurrences in the porphyry-epithermal system.

Keywords: Goshgarchay, porphyry-epithermal, geochemical, main ore components, correlation relationship, genetic characteristics.

Introduction. Porphyry-epithermal systems that contain copper-porphyry deposits are formed in the conditions of continental margins and island arcs. These deposits are associated with postcollision volcanism on the frontal part of the island arc adapted to the I-type granitoid massif and belong to the magnetite series in individual cases. The back part of the arc is related to diorite massifs and subvolcanic bodies of shoshonites (fig. 1) (Sillitoe, 210). Most of the known copper-porphyry deposits are of Mesozoic and Cenozoic age. Most of them are adapted to the system of regional divisions that create conditions for local expansions and ensure free movement of fluids. Cu-Mo, Cu-Mo-Au and Cu-Au subspecies are distinguished among copper-porphyry systems (Titley et al., 1984; Sillitoe, 2010).

Copper-porphyry deposits are the product of complex interactions of some processes and are characterized by the following features (Berger et al., 2008): 1) the presence of ore bodies with a stockwork structure adapted to a complex veinlet network and related to rich copper-sulphide mineralization; 2) genetic relationship of metasomatic changes and mineralization with the magmatic basin at a depth of 1–4 km. The predominance of medium and acidic magma adapted to the subduction zone where multiphase focuses with complex structures are formed; 3) the direct occurrence of intrusive complexes led to the formation of porphyry deposits and the dominance of vertical contact stocks and dyke systems; 4) presence of large-scale metasomatic alteration zonation. Here, chlorite-sericite metasomatite zones, secondary quartzites and marginal propylite zones cover or surround the internal potassium metasomatites (Sillitoe, 210; Titley and Bean, 1984).

The main mass of copper ores is extracted from copper-porphyry deposits by the countries of the world, and these deposits are also considered the main sources of molybdenum, gold, silver, rhenium, tellurium and platinum group elements. Copper-porphyry and copper-molybdenum-porphyry deposits and occurrences related to volcanic-plutonic complexes have been developed in most

metallogenic zones of the Azerbaijan part of the Lesser Caucasus. Copper-porphyry mineralization related to plutonic granitoid massif of Murovdag ore field is considered more promising. There are some copper-porphyry types of deposits and occurrences (Goshgarchay, Goshgardag, etc.) here that can be included in the group of large deposits of copper reserves (fig. 1) (Babazadeh et al., 1990; Mansurov, 2013).

The Goshgarchay porphyry-epithermal system is a part of the Lok-Aghdam island arc and covers the uplifted northwestern part of the Murovdag anticlinorium with an asymmetric structure, which includes a Lower Bajocian volcanogenic layer in its core, and a layer of Upper Bajocian and Bathonian successively differentiated basalt-andesite-rhyolite formations in its wings. The intrusive complexes of the porphyry-epithermal system were represented by the Goshgarchay granitoid intrusions (Goshgardag, Ojagdag, Balaja Goshgardag) and their dyke formations, which intersected the thick effusive complexes. Intrusive complexes with copper-porphyry mineralization belong to the Late Jurassic-Early Cretaceous gabbro-diorite-granodiorite formation according to their geological and petrological characteristics (Abdullayev et al., 1988; Geology of Azerbaijan, 2003). The main part of copper and molybdenum mineralization in copper-porphyry deposits within the porphyry-epithermal system is related to various ore-bearing hydrothermal-metasomatic formations. Copper mineralization is associated with quartz-sericite-chalcocopyrite, and molybdenum mineralization with feldspar-quartz-molybdenite formation (Babazadeh et al., 1990; Mansurov, 2014).

The Goshgarchay copper-porphyry deposit is a well-studied, explored and promising deposit within porphyry-epithermal system of the same name. Correlation between the main components of copper-porphyry mineralization within the porphyry-epithermal system has been investigated in this article.



Fig. 1. Porphyry Cu, Au, Mo, Ag deposits in the Tethys metallogenic belt
(<http://www.angloasianmining.com/operations/overview>, 2018)

Factual materials and research methods. The basis of the factual material was a collection of samples (about 150 pieces) taken inside and around the stockwork with vein-impregnated mineralization and on its flank to a depth of more than 500 m from the surface. The collection includes samples collected from gabbroids, quartz diorites, quartz veins with galena-sphalerite-chalcopyrite mineralization. The samples were used to make petrographic thin sections and plates polished on both sides for the study of fluid inclusions, and the rest of these samples were clustered and dispersed on sieves. Atomic absorption spectrometry on a PerkinElmer instrument allowed to quantify elements such as Cu, Mo, Cr, Ni, Co, Pb, Zn, Sr, As, Bi. Rock samples were studied by inductively coupled plasma mass spectroscopy (ISP-MS) (Turkey, Izmir). Analytical studies were performed at the USGS Analytical Laboratory of the US Geological Survey (Denver).

The results of spectral, atomic absorption and chemical analyzes were used when solving the issues of determining the main ore components and its genetic and geochemical properties in the Goshgarchay porphyry-epithermal system. The number of testing points within the porphyry-epithermal system was up to 1000. Their distribution was equal within the area. Rooty exposures were tested by natural outcrops and exploratory mountain excavations (trenches, pits, wells). All testing points were accompanied by geological-petrographic descriptions. Tests were conducted on Ag, Au, As, Bi, Ca, Cd, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Se, Sr, Ti, V and other elements. The solution of the issues is based on the primary materials of the results of the analyses of the host rocks and minerals. The processing of the statistical results of the geochemical data on the results was carried out by the "STATISTICA" and "MINITAB-16" programs (Belonin et al., 1982). SPSS statistical package was used to calculate the factor analysis.

Determining characteristics of the main ore components in the Goshgarchay porphyry-epithermal system. The method of factor analysis was used when solving the determining issues of the main ore components,

its genetic and geochemical characteristics in the Goshgarchay ore-magmatic system. As it is well known, the factor analysis method is considered one of the modern multivariate statistical methods and is widely used in solving a number of statistical problems in various fields of geology, including ore geology (Belonin, 1982). The method of factor analysis allows a deep understanding of its importance and is considered very important when developing the geological basis of prospecting and exploration of mineral deposits.

The results of the chemical analyzes of well cores, which were dug up to an average of 180 m in the studied area, and surface mountain excavations were used in order to clarify the geochemical and genetic characteristics of the copper-porphyry system in the Goshgarchay ore-magmatic system. Correlation matrix, load factor, factor weight and specific value were calculated by the use of factor analysis for the selected elements (Mansurov, 2018). The main ore elements are combined into two groups to solve the issue. Elements such as Cu, Pb, Zn, Sb, As belong to the first group, and elements such as Ni, Co, Ti, V, Cr, Bi belong to the second group. As a result of the processing, two factors reflecting the correlation relationship between the six ore components were obtained (Table 1).

All factors are considered ore-bearing, or rather, the elements characterized by the maximum charge in these factors took part in the process of ore formation.

The load factor, specific value and factor weight shown in Tables 2 and 3 show that the characteristics of Cu, Pb, Zn, Sb and As elements are determined by the F_1 factor. The analysis of the main components of the F_1 factor shows that there is a significant positive correlation between this load factor and Cu (0.819067), Mo (0.694623), Sb (0.927197) and As (0.87989), a significant negative correlation with Zn (-0.24141), and a weaker but positive correlation with Pb (0.097005). Such a selection of the main components and their behavioral characteristics allow to conclude that the F_1 factor reflects the process of ore deposition by introducing Cu, Mo, Sb and As elements (Belonin, 1982; Mansurov, 2018).

Table 1

Amount of Cu, Mo, Pb, Zn, Sb and As elements in Goshgarchay porphyry-epithermal system

Sinaq-Lar	G-72	G-73	G-74	G-79	G-80	G-82	G-75	G-76	G-77	G-78	G-84	G-85	G-86	G-87
Koordinatlar	40.414	40.415	40.415	40.412	40.25	40.411	40.414	40.414	40.414	40.412	40.410	40.410	40.409	40.409
	45.929	45.929	45.929	45.929	45.93	45.932	45.929	45.929	45.929	4.928	45.934	45.934	45.936	45.936
Cu	105	248	149	116	214	49.6	88.4	104	66.2	334	15000	10900	20300	1350
Mo	0.9	0.83	0.77	0.67	2.1	1.0	2.8	2	2.1	1.6	4.6	4.5	4.2	7.2
Pb	11.1	5.52	3.68	3.08	13.0	7.91	51.8	3.64	3.88	68.1	6.71	9.5	6.93	6.78
Zn	83.7	1120	130	68.8	90	60.1	173	77.2	124	636	106	49.6	79.3	35.3
Sb	0.59	0.42	0.45	0.26	1.1	0.22	0.95	0.21	0.2	0.88	1.0	2.1	1.2	0.52
As	1.9	1.4	2.0	2.2	5.6	4.9	2.0	4.1	<1	4.6	5.9	12.6	7.5	1.3

Note: G-72-74-gabbro; G-75-77-andesite; G-79-gabbro; G-80-diorite; G-82-basalt; G-78-secondary quartzites; G-84-ore-bearing secondary quartzites; G-85-copper-porphyry ores; G-86-87 ore-bearing secondary quartzites

Table 2

Load factors of elements

No. of samples	F ₁	F ₂
G-72	-0,58899	0,243737
G-73	-0,89294	-1,201
G-74	-0,72568	0,451854
G-75	-0,00621	-1,26353
G-76	-0,70914	0,581864
G-77	-1,01748	0,57006
G-78	0,142963	-2,60776
G-79	-0,83928	0,638302
G-80	0,253752	-0,01659
G-82	-0,5422	0,490929
G-84	1,06751	0,608548
G-85	2,28486	-0,02201
G-86	1,531631	0,604217
G-87	0,041206	0,92138

Note: in bold background – the significant value of the load factor is shown

Table 3

Load factor, specific value and factor weight on elements

Elements	F ₁	F ₂
Cu	0,819067	0,24515
Mo	0,694623	0,253405
Pb	0,097005	-0,85986
Zn	-0,24141	-0,71234
Sb	0,927197	-0,20243
As	0,87989	0,018338
Special price	2,854961	1,41241
Factor jack	0,475827	0,235402

Note: in bold background – the significant value of the load factor is shown

The analysis of F₂ load factor shows that it has a significant positive relationship with the elements Cu (0.24515) and Mo (0.253405), a negative relationship with the elements Pb (-0.85986), Zn (-0.71234) and Sb (-0.20243), and a weaker but positive relationship with the element As (0.018338). Such a state of the F₂ factor suggests that the migration and concentration of Cu and Mo elements in

the main mineralization process took place under different conditions (fig. 2). The data of the behavior of Mo and Cu under different physico-chemical conditions suggest the presence of small amounts of Cu in molybdenum-bearing ore solutions and Mo in copper-bearing solutions (Nikolayev, 2016; Mansurov, 2018).

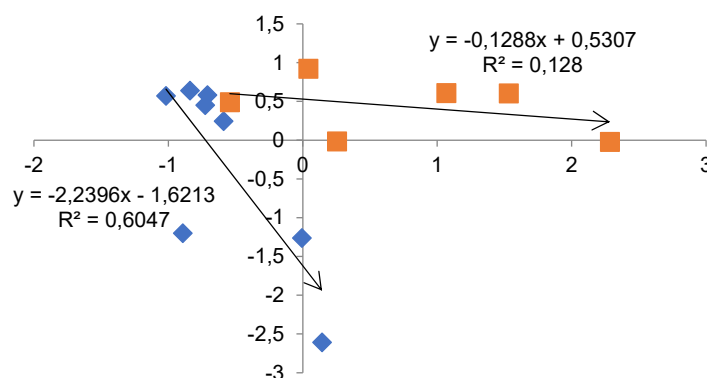


Fig. 2. Dependency graph of factors F₁ and F₂ on the results of factor analysis (on Cu, Mo, Pb, Zn, Sb and As elements)

The importance of factor F_1 , which corresponds to Cu (Mo) association, is statistically related to the retention of chalcopyrite and molybdenite in Cu-Mo porphyry mineralization (chalcopyrite-molybdenite) (Belonin, 1982; Nikolayev, 2016). The positive correlation between the F_2 factor and the amount of Pb, Zn, Sb and As elements confirms indirectly the overlay of copper-porphyry mineralization on the porphyry and subepithermal stage of the ore deposition process (Belonin, 1982; Mansurov, 2021).

14 of the samples taken from the host rocks within the Goshgarchay copper-porphyry deposit were analyzed in order to determine the amount of elements such as Ni, Co, Ti, V, Cr and Bi in the ore-magmatic system of the same name. As a result of processing the analysis results of these samples, 3 factors reflecting the correlation relationship between 6 ore elements were obtained (fig. 3). The

concentration of these elements in the samples is shown in table 4, and the load factor, specific value and factor weight are shown in Table 5.

As can be seen from Table 5, the F_1 load factor has a complex character and there is a significant positive correlation between the F_1 factor and Ni (0.94983), Co (0.959018), Cr (0.903098) and a significant negative correlation between Ti (−0.30861) and Bi (−0.61712).

There is a significant positive correlation between the F_2 factor and Ni (0.94983), Bi (0.555844), a negative correlation between Ti (−0.30861) and a weaker but positive correlation with Co (0.042407), V (0.007864) elements.

The results of the correlation matrix of the elements are shown in Table 7 and the following positive and negative correlation relationship between the elements is determined.

Table 4

Amount of Ni, Co, Ti, V, Cr and Bi elements in the Goshgarchay porphyry-epithermal system														
Trials	G-72	G-73	G-74	G-79	G-80	G-82	G-75	G-76	G-77	G-78	G-84	G-85	G-86	G-87
Coordinates	40.414	40.415	40.415	40.412	40.25	40.411	40.414	40.414	40.414	40.412	40.410	40.410	40.409	40.409
	45.929	45.929	45.929	45.929	45.93	45.932	45.929	45.929	45.929	4.928	45.934	45.934	45.936	45.936
Ni	2.2	20.8	534	492	17.9	26.8	321	519	539	597	34.9	34.8	46.4	15.0
Co	0.61	21	84.9	83.7	17.4	20.2	59.2	85.6	88.7	95.2	9.5	8.4	13.2	10
Ti	667	891	3.68	990	6750	2520	1230	886	949	770	1300	819	1090	1160
V	127	120	151	196	120	323	202	161	156	159	180	123	158	92.2
Cr	1260	1340	1530	2360	261	203	1520	1780	2210	2260	719	738	251	421
Bi	0.12	0.06	0.07	0.06	0.14	0.06	0.13	0.06	0.06	0.1	0.88	0.44	0.32	0.08

Table 5

Results of factor analyzes of elements			
No. of samples	Factor 1	Factor 2	Factor 3
G-72	−0.49629	0.284595	−0.7402
G-73	−0.2031	0.113155	−0.84754
G-74	0.976721	0.0241	−0.13388
G-75	0.400452	0.033848	0.685826
G-76	1.060658	0.05588	−0.00529
G-77	1.263956	0.121979	−0.15025
G-78	1.359442	0.311581	−0.07493
G-79	1.194637	0.13958	0.497577
G-80	−0.77459	−2.781	−0.87924
G-82	−0.75298	−1.01647	2.852318
G-84	−1.49069	1.745758	0.530589
G-85	−0.94606	0.882604	−0.60155
G-86	−0.95203	0.335893	0.055853
G-87	−0.64012	−0.2515	−1.1893

Table 6

Load factor, specific value and factor weight of elements			
Elements	F_1	F_2	F_3
Ni	0.94983	0.123226	0.088395
Co	0.959018	0.042407	0.129709
Ti	−0.30861	−0.84415	0.003185
V	0.057914	0.007864	0.994674
Cr	0.903098	0.29171	−0.07573
Bi	−0.61712	0.555844	0.042269
Special price	3.116917	1.123695	1.021545
Factor jack	0.519486	0.187282	0.170258

Table 7

Correlation matrix						
Elements	Ni	Co	Ti	V	Cr	Bi
Ni	1	0.990867	−0.30908	0.121217	0.859261	−0.38713
Co	0.990867	1	−0.24878	0.164289	0.846999	−0.44446
Ti	−0.30908	−0.24878	1	−0.04683	−0.47416	−0.03899
V	0.121217	0.164289	−0.04683	1	−0.01001	−0.02715
Cr	0.859261	0.846999	−0.47416	−0.01001	1	−0.36232
Bi	−0.38713	−0.44446	−0.03899	−0.02715	−0.36232	1

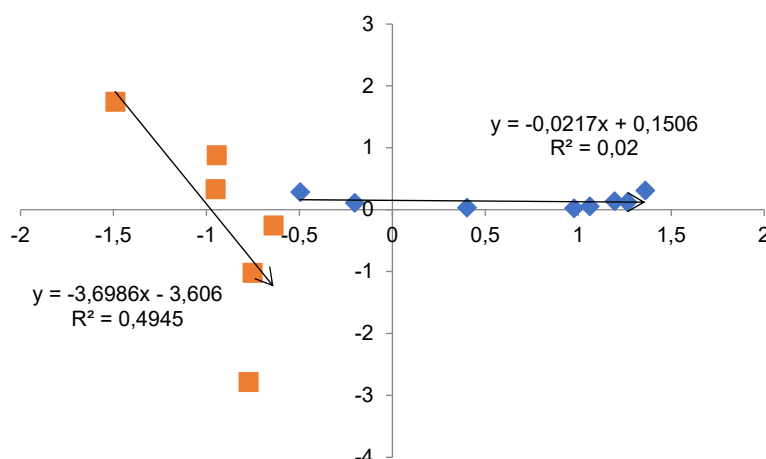


Fig. 3. Dependency graph of factors F_1 and F_2 on the results of factor analysis (on Ni, Co, Ti, V, Cr and Bi elements)

A positive relationship was determined between Ni-Co ($r = 0.990867$), Ni-V ($r = 0.121217$), Ni-Cr ($r = 0.859261$), Co-V ($r = 0.164289$), Co-Cr ($r = 0.46999$) pairs, and a negative relationship was determined between Ni-Ti ($r = -0.30908$), Ni-Bi ($r = -0.38713$), Co-Ti ($r = -0.24878$), Co-Bi ($r = -0.44446$), Ti-V ($r = -0.04683$), Ti-Cr ($r = -0.47416$), Ti-Cr ($r = -0.03899$),

V-Cr ($r = -0.01001$), V-Bi ($r = -0.02715$) pairs during correlation analysis ($R = 5\%$).

The analysis of the correlation matrix of the elements allows to clarify the interrelationship of the elements and this is shown graphically (fig. 4).

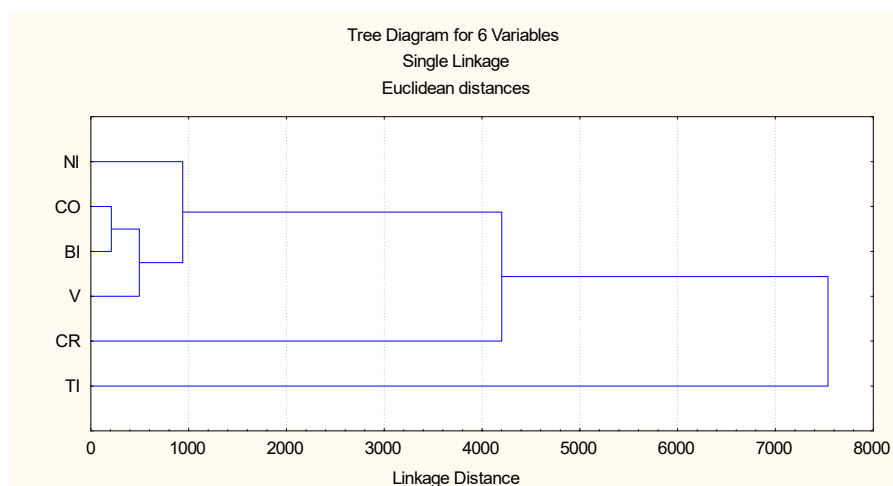


Fig. 4. Dendrogram of cluster analysis of elements

As can be seen from the results of the analysis shown in Table 7 and the dendrogram of the correlation coefficient and cluster analysis in fig. 3, the elements are concentrated in two groups: 1) Ni-Co-Bi; 2) Cr-Ti.

It can be concluded from the abovementioned materials that the elements are grouped in factors or geochemical associations comparable to the mineral paragenesis of the main ore deposition stage. According to M.D. Belonin et al., this grouping is confirmed by the correlation coefficient between geochemical and mineral properties, factor importance and main ore elements (Grabejev et al., 1985).

The results of the factor analysis, correlation matrix and load factor on elements Ba, Sr, Rb, Li and Cs are shown in tables 8, 9 and 10. As it can be seen from here, a positive relationship was determined between Ba-Sr ($r = 0.718825$), Ba-Rb ($r = 0.597813$), Sr-Rb ($r = 0.410724$), Sr-Cs ($r = 0.49621$), Rb-Li ($r = 0.207225$), Rb-Cs ($r = 0.00467$), Li-Cs ($r = 0.4801$) pairs, and a negative relationship was determined between Ba-Li ($r = -0.36623$), Ba-Cs ($r = -0.27263$), Sr-Li ($r = -0.6264$), Sr-Cs ($r = -0.49621$) pairs during the correlation analysis ($R = 5\%$).

Table 8

Trial	G-72	G-73	G-74	G-79	G-80	G-82	G-75	G-76	G-77	G-78	G-84	G-85	G-86	G-87
Coordinates	40.414	40.415	40.415	40.412	40.25	40.411	40.414	40.414	40.414	40.412	40.410	40.410	40.409	40.409
	45.929	45.929	45.929	45.929	45.93	45.932	45.929	45.929	45.929	4.928	45.934	45.934	45.936	45.936
Ba	50.2	170	57	120	864	26.8	106	59.2	93.5	48.8	456	95.7	46.4	112
Sr	39.9	42.4	35.6	33.7	699	50	69.7	29.9	30.6	41.1	240	249	196	290
Rb	9.1	8.2	12.4	7.5	23.6	0.73	1.9	8.2	12.3	14	3.3	3.5	2.6	3.0
Li	6.9	7.0	151	10.9	2.4	3.7	3.8	11.5	12.1	7.4	5.5	3.9	4.9	0.23
Cs	0.75	0.68	1530	0.14	0.08	0.31	1.4	1.7	1.4	1.1	0.44	0.33	3.4	0.42

Table 9

Correlation matrix					
Elements	Ba	Sr	Rb	Li	Cs
Ba	1	0,718225	0,597813	-0,36623	-0,27263
Sr	0,718225	1	0,410724	-0,6264	-0,49621
Rb	0,597813	0,410724	1	0,207225	0,004672
Li	-0,36623	-0,6264	0,207225	1	0,4801
Cs	-0,27263	-0,49621	0,004672	0,4801	1

Table 10

Load factor, specific value and factor weight		
No. of samples	Factor 1	Factor 2
G-72	-0,45585	-0,01598
G-73	-0,29831	-0,02739
G-74	-0,37886	-0,41237
G-75	-0,57507	0,616692
G-76	-1,28333	-1,13431
G-77	-1,0357	-1,45335
G-78	0,169205	-1,32235
G-79	-0,46452	-0,0926
G-80	2,919129	-1,24843
G-82	-0,21838	1,472201
G-84	0,539637	0,477966
G-85	0,275756	1,118647
G-86	0,445845	0,862301
G-87	0,360446	1,158973

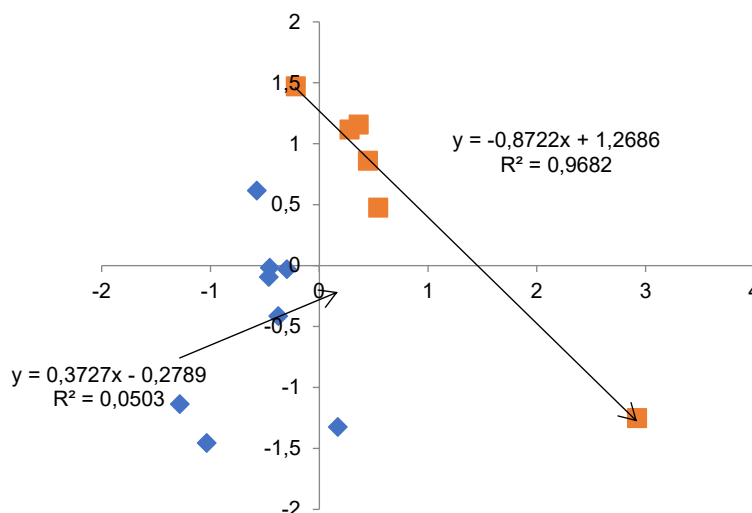


Fig. 5. Dependency graph of factors F_1 and F_2 on the results of factor analysis (on Ba, Sr, Rb, Li and Cs elements)

A geochemical mineral association, which provides conditions for the localization of the development area of mineralization at different stages of the formation of the copper-porphyry system based on the results of factor analysis, was found. The Goshgarchay copper-porphyry deposit is characterized by an upper ore erosional truncation, and a significant amount of copper-porphyry mineralization is predicted to the depth (Mansurov, 2014).

It can be noted on the basis of the abovementioned data that according to (Rekharsky et al., 1983), elements (Ni, Co, Bi, Cr, Ti) that are less typical for hydrothermal solutions retain their independence in all rocks, and their grouping is probably related to the differentiation of magma crystallization (Khitarov, 1977). Also, the elements such as Cu, Pb, Zn, Ag and Mo have specific places in the mineralization process, and their presence in one or another group is related to the degree of hydrothermal activity of the

rocks, which are considered as sources of these elements (Khitarov, 1977; Mansurov, 2021).

Conclusions

1) The investigation of the cluster analysis results shows that the elements (Mn, Ti, Cr, V, Sr) that are less typical for hydrothermal solutions retain their independence in all host rocks, and the presence of their grouping is most likely related to their transport processes from the host basic-intermediate silicate rocks.

2) The total of all analyzed tests represents two combinations of determination of major ore components: normal determination in ores and lognormal determination in host rocks.

3) As it can be seen from the analysis, correlation relationships between elements in copper-porphyry mineralization are characterized by a wide range of element impurities. This includes chalcophile (As, Sb, Cu, Bi, Cd, Ga, In, Ge, Au, Ag, Te) and siderophile (Co, Ni, Mo, Fe, Cr) elements.

4) The analysis of the main components of the F₁ factor shows that this load factor is determined by a significant positive correlation between the values of Cu, Mo, Sb and As factors.

5) The positive correlation relationship between the F₂ factor and the amount of Pb, Zn, Sb and As elements confirms indirectly the overlay of copper-porphyry mineralization on the porphyry and subepithermal stage of the ore deposition process.

6) The elements are grouped in factors or geochemical associations comparable to the mineral paragenesis of the main ore deposition stage. Geochemical and mineralogical characteristics are confirmed by factor importance and correlation coefficient between main ore elements.

7) The element-indicators for various factors are following: 1 – Zn, Cu, Co, Ni – for the composition factor of rocks; 2 – Cu, Mo, Co, Ni – for geochemical specialization and primary magma type factors; 3 – Mo – for the depth factor; 4 – Pb, Mo, Zn and Cu – for ore-bearing factor.

References

- Abdullayev, R.N., Mustafayev, G.V., Mustafayev, M.A. (1988). Mesozoic magmatic formations of the Lesser Caucasus and associated endogenous mineralization. Elm [in Russian].
- Babazadeh, V.M., Makhmudov, A.I., Ramazanov, V.G. (1990). Copper and molybdenum porphyry deposits. Azerneshr [in Russian].
- Belonin, M.D., Golubeva, V.A., Skublov, G.T. (1982). Factor analysis in geology. Moscow: Nedra [in Russian].
- Geology of Azerbaijan. (2003). Magmatism. Publishing house Nafta-Press [in Russian].
- Grabbezh, A.I., Chashchukhina, V.A. (1985). On the correlation between elements of porphyry copper deposits. *Geochemistry*, 12, 1792–1794 [in Russian].
- Khitrov, N.I. (Ed.) (1977). Geochemistry of migration processes of ore elements. Nauka [in Russian].

Mansurov, M.I. (2014). Models of ore-magmatic systems of copper-porphyry of deposits of Goshgarchay ore field (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Journal of News of the Siberian department of the section of earth Sciences of the RANS. Geology, Exploration and Development of mineral deposits*, 4(47), 29–42 [in Russian].

Mansurov, M.I. (2018). Features of the distribution of the main ore components in the Goshgarchay ore field (Murovdag ore district). *News of Baku University, series of natural sciences*, 4, 52–60 [in Russian].

Mansurov, M.I. (2021). Distribution peculiarities of basic ore components in Goshgarchay porphyrous copper deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 54, 96–105. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-54-07>

Mansurov, M.I. (2021). Location Peculiarities and evolution of Goshgarchay copper-porphyre field (Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(93), 41–51. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.93.05>.

Nikolaev, Yu. N., Baksheev, I.A., Prokofiev, V.Yu., Nagornaya, E.V., Marushchenko, L.I., Sidorina, Yu.N., Chitalin, A.F., Kalko, I.A. (2016). Au-Ag mineralization of porphyry-epithermal systems of the Baim zone (Western Chukotka, Russia). *Geology of ore deposits*, 58(4), 319–345 [in Russian].

Pavlova, I.G., Sakhnovsky, M.L. (1988). Models of ore-magmatic systems of molybdenum-copper porphyry deposits as a basis for their prospecting and forecasting. In: Ore formation and genetic models of endogenous ore formations. By A.A. Obolensky, V.I. Sotnikova, V.N. Sharapova (Eds.). Nauka [in Russian].

Rekharsky, V.I., Varyash, L.N., Kapsamun, V.P. (1983). On the genesis of molybdenum and copper mineralization of copper-molybdenum deposits. In the book "Genetic models of endogenous ore deposits". V. 1. Nauka, 135–143 [in Russian].

Sillitoe, R.H. (2010). Porphyry Copper Systems, Society of Economic Geologists, Inc. *Economic Geology*, 105, 3–41.

Titly, S.R., Bean R.E. (1984). Porphyry copper deposits. Genesis of ore deposits. Mir [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 20.01.23

Прорецензовано / Revised: 16.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Мамой МАНСУРОВ, канд. геол.-мінералог. наук, доц.

ORCID ID: 0000-0001-8673-3034

e-mail: mamoy_mansurov@mail.ru

Бакинський державний університет, Баку, Республіка Азербайджан

ГЕОХІМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНИХ РУДНИХ КОМПОНЕНТІВ ГОШГАРЧАЙСЬКОЇ ПОРФІРОВО-ЕПІТЕРМАЛЬНОЇ СИСТЕМИ (МАЛІЙ КАВКАЗ, АЗЕРБАЙДЖАН)

Розглянуто визначальні характеристики рудних елементів Гошгарчайської порфіро-епітермальної системи. Вивчено генетичні та геохімічні характеристики основних рудних компонентів, а також визначено тісні позитивні та негативні зв'язки між парами елементів за допомогою кореляційного аналізу на визначених елементах. За результатами кластерного аналізу проаналізовано геохімічні асоціації, що дають змогу локалізувати зону розвитку мінералізації на різних етапах формування порфіро-епітермальної системи. Серед рудних елементів вмісних і рудоємних інтрузивних порід виділяють такі ряди стійких елементів, характерних для гідротермальних родовищ: Cu, Mo, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Mn, Ti, Cr, V, Sr та ін. Цю групу елементів вважають елементами-індикаторами мідно-порфірового родовища порфіро-епітермальної системи. Встановлено, що кореляції між елементами в мідно-порфіровій мінералізації характеризуються широким спектром домішок елементів. Він включає як халькофільні (As, Sb, Cu, Bi, Cd, Ga, In, Ge, Au, Ag, Te), так і сидерофільні (Co, Ni, Mo, Fe, Cr) елементи. Діапазон значень вертикальної геохімічної зональності на окремих ділянках родовища дає змогу оцінити рівень ерозійної зрізаності проявів порфіро-епітермальної системи.

Ключові слова: Гошгарчай, порфіро-епітермальні, геохімічні, основні рудні компоненти, кореляційний зв'язок, генетичні характеристики.

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

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

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.042:553.43

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.07>

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

Айнель ЄСЕНДОСОВА, асп.

e-mail: ainelesendosova@mail.ru

НАО "Карагандинський технічний університет імені Абілкаса Сагінава", Караганда, Республіка Казахстан

ПОРІВНЯЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОЛОГІЧНОЇ БУДОВИ І СВИНЦЕВО-ЦИНКОВОЇ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ УСПЕНСЬКОГО (ЦЕНТРАЛЬНИЙ КАЗАХСТАН) І БЕРЕГІВСЬКОГО (ЗАКАРПАТТЯ) РУДНИХ РАЙОНІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол.-мінералог. наук, проф. В.М. Загнітком)

Проведено порівняльну характеристику геологічної будови Успенського (Центральний Казахстан) і Берегівського (Закарпаття) рудних районів для з'ясування факторів та критеріїв свинцево-цинкового зруденіння, закономірностей розташування, особливостей формування та локалізації родовищ поліметалів. Встановлено, що головними факторами поліметалічної мінералізації служать структурні, літолого-стратиграфічні, магматичні, метасоматичні, проявлені на різних рівнях організації рудної речовини, у різний час, у різних геолого-структурних умовах. Проведені дослідження дозволяють рекомендувати отримані висновки щодо факторів та критеріїв поліметалічного зруденіння як науково-методичні засади прогнозу та пошуків свинцево-цинкових родовищ в інших регіонах світу. Отримані нові дані про атасуєвський тип родовищ Казахстану дають змогу успішно вирішувати багато питань генезису подібних поліметалічних родовищ, показують їхній взаємозв'язок і закономірності формування у зв'язку із субмаринною вулканічною діяльністю. Ці дані за своїм значенням далеко виходять за межі Успенського поясу і Центрального Казахстану та зближуються з іншими матеріалами поліметалічних родовищ світу.

Ключові слова: поліметалічна мінералізація, рудний район, фактори та критерії зруденіння.

Постановка проблеми. Свинець і цинк мають велике значення для економіки розвинених країн світу. Свинець, завдяки хімічній стійкості, ковкості та м'якості, великій питомій вазі та низькій температурі плавлення, широко застосовується для виробництва акумуляторів, антидетонаторної домішки до бензину, оболонок кабелів, виготовлення шрапнелі та сердечників куль, екранів для захисту від радіоактивного випромінювання та ін. Цинк, завдяки антикорозійним властивостям, застосовується для оцинкування залізних листів, труб, дроту, виготовлення різних сплавів, цинкових білил, акумуляторних батарей, наповнювачів гуми та ін. Казахстан входить до провідних країн світу за запасами і видобутком

свинцю і цинку (табл. 1), де відомі великі рудні райони з поліметалічною мінералізацією, у тому числі Успенський рудний район (УРР) у Центральному Казахстані. Свинцево-цинкова мінералізація відома і в Україні, зокрема жильне зруденіння Берегівського рудного району в Закарпатті, хоча її розмах значно менший. Порівняльна характеристика цих рудних районів може мати велике значення не тільки для вирішення питань про закономірності формування, фактори та критерії свинцево-цинкової мінералізації, але й для об'єктивної оцінки рудного потенціалу цих та подібних поліметалічних районів та визначення напрямків подальших геологорозвідвальних робіт.

Таблиця 1

Світові запаси і видобуток свинцю і цинку в 2019 р. (тис. т) (Mineral Commodity Summaries, 2020)

Країна	Свинець		Цинк	
	Видобуток	Запаси	Видобуток	Запаси
США	280	5 000	780	11 000
Австралія	430	36 000	1 300	68 000
Болівія	100	1 600	460	4 800
Китай	2 100	18 000	4 300	44 000
Індія	190	2 500	800	7 500
Казахстан	90	2 000	290	12 000
Мексика	240	5 600	690	22 000
Перу	290	6 300	1 400	19 000
Росія	220	6 400	300	22 000
Швеція	60	1 100	230	3 600
Туреччина	70	860	?	?
Канада	?	?	300	2 200
Інші країни	430	5 000	1900	34 000
ВСЬОГО	4 500	90 000	13 000	250 000

Аналіз попередніх досліджень. Вивчення Успенського рудного району має тривалу історію. Планомірне вивчення УРР почалося наприкінці 20-х років ХХ ст. Першими дослідниками можна вважати І.С. Яговкіна та

М. П. Русакова (1928–1933 рр.), які фактично встановили наявність тектонічної зони та вказали на найважливішу роль цієї структури. Широкі комплексні роботи з вивчення кольорових, чорних та рідкісних металів було

розпочато у 1962 р. під керівництвом К. І. Сатпаєва. У результаті проведених робіт було виділено Успенський рудний пояс, підготовлено капітальну монографію (Щерба і др., 1968), у якій описано основні особливості його геологічної будови та металогенії. У низці недавніх робіт значну увагу приділено аналізу геодинамічних обставин формування металогенічних комплексів як основи прогнозування та перспективної оцінки мінеральних ресурсів Казахстану (Мазуров, 2005 та ін.).

Свинцево-цинкові родовища в Україні відомі й розробляються з XVIII ст. в Передкарпатті (Трускавецьке), на межі XIX–XX ст. – у Нагольному краї Донбасу (Нагольчанське і Нагольно-Тарасівське) і в Карпатах (Рахівське), а в XX ст. – родовища Берегівського рудного району. Питання створення власної мінерально-сировинної бази свинцю і цинку є надзвичайно актуальним, оскільки Україна свого часу мала значні потужності щодо виробництва свинцевої і цинкової продукції (Костянтинівський завод "Укрцинк", акумуляторний завод ІСТА в Дніпропетровську, "Азовсталь" в Маріуполі, "Поліграфтехніка" в Олександрії, "Південькабель" в Харкові та ін.), які забезпечувалися експортною продукцією. Їх відновлення, безперечно, буде частиною відновлення економіки нашої країни. Зведення про геологічну будову і деякі особливості поліметалічної мінералізації віддзеркалені в ряді наукових робіт (Гурський та ін., 2006; Гурський, 2008; Зацыха і др., 1984; Лазаренко і др., 1968; Сасюк, 2001; Третьяков, Сальников, 1998; Mykhailov et al., 2022 та ін.).

Виділення нерозв'язаних частин загальної проблеми. Проведення подальших досліджень зумовлене

необхідністю розробки та вдосконалення науково-методичних основ прогнозу та пошуків свинцево-цинкових родовищ, розвинених у різновікових структурно-формаційних комплексах давніх і молодих платформ, серединних масивів (мікроконтинентів), структурах тектономагматичної активізації, виявлення значущості розглянутого сімейства родовищ у структурі мінерально-сировинної бази свинцю та цинку.

Формулювання цілей статті. Метою статті є порівняльна характеристика двох важливих рудних районів з різною геологічною будовою, віком та структурно-тектонічними умовами формування поліметалічної мінералізації та, на основі цього, – з'ясування факторів і критеріїв свинцево-цинкового зруденіння, закономірностей розташування, особливостей формування та локалізації поліметалічних родовищ.

Успенський рудний район розташований у східній частині Центрального Казахстану, у межах Алтайського та Забайкальсько-Монгольського орогенного колажу або Центральноазійського орогенного поясу (ЦАОП) (рис. 1). Згідно із сучасними уявленнями ця гігантська структура є довгоживучим орогенним колажем, який розвивався з кінця мезопротерозою до мезозою шляхом акреції магматичних дуг, пластин офіолітів, мікроконтинентів і акреційних клинів (Seltmann, Porter, 2005). Колаж складається з фрагментів осадових басейнів, островних дуг, акреційних клинів і тектонічно обмежених террейнів, складених неопротерозойськими і палеозойськими породами, що виникли в результаті субдукції, колізії, транскуртантних рухів, інших інтенсивних тектонічних процесів.

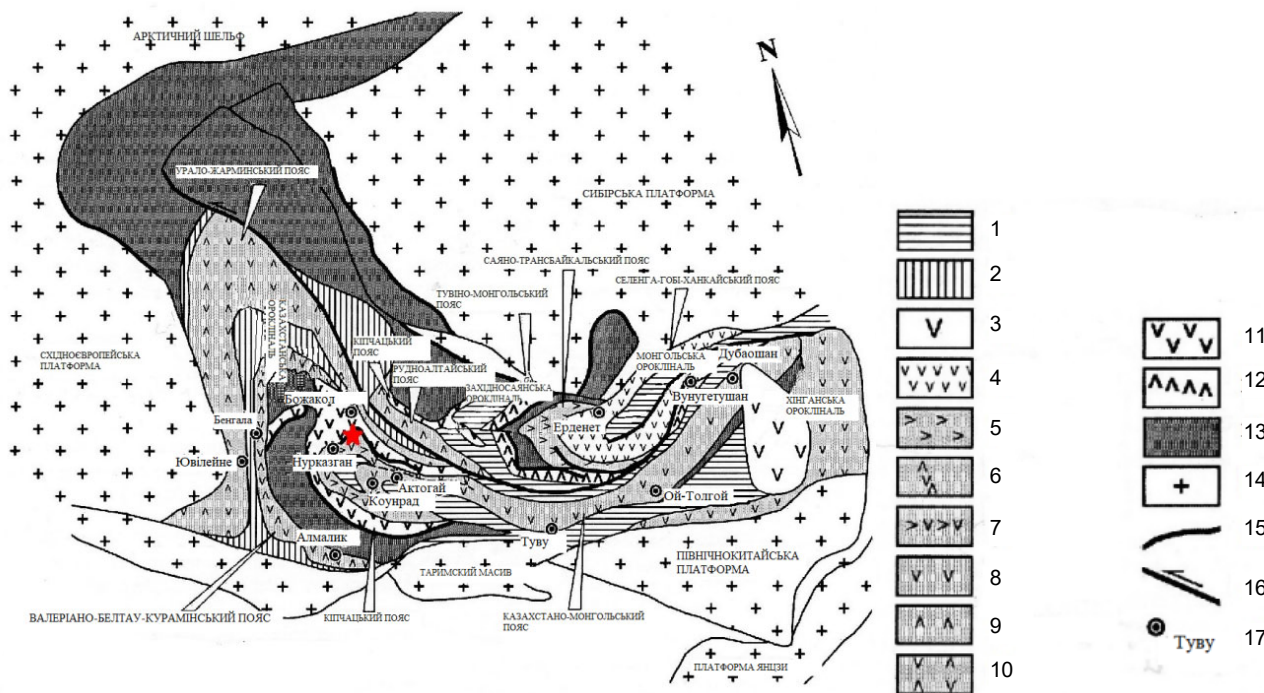


Рис. 1. Схематична тектонічна карта Алтайського та Забайкальсько-Монгольського орогенного колажу:

- 1 – недиференційовані акреційні комплекси; 2 – акреційні комплекси в шовних задугових і дугових басейнах;
- 3 – пізньомезозойський яншанський магматизм; 4 – пізньопалеозойсько-середньомезозойська Селенга-Гобійсько-Ханкінська магматична дуга; 5 – середньо-пізньопалеозойська Саяно-Забайкальська дуга; 6 – середньо-пізньопалеозойська Валер'янівсько-Бельтау-Кураминська дуга; 7–8 – середньо-пізньопалеозойська Казахсько-Монгольська дуга, у т. ч. силур-девонський сегмент (7), 9 – середньопалеозойська Рудно-Алтайська дуга; 10 – середньопалеозойська Урало-Жармінська дуга; 11 – неопротерозойсько-ранньопалеозойська Кипчацька дуга; 12 – неопротерозойсько-ранньопалеозойська Тувино-Монгольська дуга;
- 13 – протерозойські предраліди; 14 – докембрійські кратони і мікроконтиненти; 15 – шовна зона; 16 – зсуви;
- 17 – Cu-Mo-порфірові родовища. Червоною зірочкою позначено родовище Алайгир

УРР розташований у межах Балхаш-Ілійського поясу середньо-пізньопалеозойської Казахсько-Монгольської дуги ЦАОП, який включає осадові товщі, дугові вулканічні та інтрузивні породи переважно девонського та карбонівського віку, деформовані під час пермського "герцинського" орогенезу. У цьому дуговому поясі розташоване також гігантське Коунрадське порфірове мідно-золоте родовище (230 км на південь від озера Балхаш). У структурному відношенні район належить до системи Центральноказахстанського герцинського складчастого поясу, спрямованого в цьому районі на схід-північний схід. Основними регіональними структурами тут є великі антиклінорії – Тектурмас на півночі і Жаман-Сарис на півдні, складені в основному силурійськими відкладами. Між ними розташований досить вузький і сильно стиснутий Успенський синклінорій, що містить переважно девонські та нижньокам'яновугільні відклади.

Північна частина Успенського синклінорія і прилегла південна частина Тектурмаського антиклінорія інтродовані численними гранітоїдними інтрузіями, серед яких переважають пост-середньокам'яновугільно-пермські інтрузії, що утворюють так званий Калдирмінсько-Каркаралінський інтрузивний пояс. На півдні, паралельно гранітному поясу і в межах Успенського синклінорія, на схід-північний схід проходить регіональна зона дислокацій та метаморфізму, відома як зона Успенського розлому. Зона розлому виникла в результаті пізньопермських та ранньотріасових лівозсувових зміщень на захід від Центральноказахстанської зони розломів, що має субмеридіональний напрямок.

УРР за кількістю, різноманітністю та промисловою цінністю родовищ входить до числа найважливіших рудних районів Республіки Казахстан (Байбатша, 2008; Парілов, 2012; Ужжєнов и др., 2004). Як відомо, одним із важливих структурних елементів земної кори є глибинні рухливі зони, що проявляються як зони активізації, які визначають розвиток седиментаційних фацій, складчастих поясів, контролюють розміщення магматизму і пов'язаного з ним зруденіння. До таких зон у Центральному Казахстані належить Успенська, виділена як зона зминання ще у 1928 р. М.П. Русаковим та І.С. Яговкіним, до якої приурочений УРР. Вона простежується на 400 км за ширини 60–100 км на північний схід від Атасуйського рудного району на заході і до району родовища Карагайли на сході. В УРР відомо 179 мідних рудних об'єктів та 215 свинцево-цинкових. Основну цінність в УРР становлять стратиформні комплексні родовища залізо-марганцевих, свинцево-цинкових і баритових руд багатетапного формування. За рядом геологічних характеристик рудні родовища району виділено в самостійний атасуйський генетичний тип.

Найважливішу рудоконтролювальну роль відіграють тріщини, пов'язані з розломами глибокого закладання, яким у верхніх горизонтах відповідають межі горст-антикліналей та грабен-синкліналей, флексурні перегини, інші пліквативні структури. Лінійний характер тріщин зумовив стрічкоподібну форму рудних покладів, що розташовані над ними. Рудні тіла приурочені до лінійно-втягнутих складчастих елементів: крил складок, флексурних перегинів та ін.

Віковий діапазон порід, що містять зруденіння, в Успенському поясі широкий – від нижнього рифею до верхнього карбону-пермі. Максимальна кількість рудопроявів зафіксована в осадових та вулканогенно-осадових породах верхнього девону та нижнього карбону. Нижче і вище за розрізом зустрічаються головним чином дрібні рудопрояви, переважно кварцово-жильного типу. Верхньодевонські ефузивні породи містять підвищені

вмісти заліза, марганцю, свинцю, цинку, тобто тих елементів, які є провідними в рудах атасуйських родовищ. Це, ймовірно, свідчить про спеціалізацію магматичних осередків верхньодевонського вулканізму, що генерували рудоносні розчини.

В УРР відомі поліметалічні родовища двох геолого-генетичних типів: 1) вулканогенно-осадові з накладеним гідротермальним зруденінням (атасуйський тип); 2) гідротермальні (алайгирський тип).

Для першого типу (атасуйського) характерні: 1) приуроченість зруденіння до вуглисто-глинисто-кременисто-карбонатних порід пізньодевонського віку, які зазвичай перебувають у тонкому перешаруванні; 2) стратифікованість руд; 3) просторове поєднання залізо-марганцевого та поліметалічного зруденіння; 4) накладення на смугасті стратифіковані пластові залізо-марганцеві та убогі цинкові руди цинково-свинцево-баритового гідротермального зруденіння, їхнє просторове поєднання.

Зустрічається два підтипи руд. Перший представлений пластовими тілами шаруватих істотно цинкових пірит-сфалеритових руд, утворення яких близько синхронно з утворенням залізних і марганцевих руд і накопиченням матеріалу осадових і вулканогенно-осадових порід, що їх вміщують, з якими вони залягають згідно. Другий представлений лінозоподібними покладами, часто ускладненими апофізами, пластоподібними тілами в певних стратиграфічних горизонтах, приуроченими до тектонічно ускладнених ділянок (зон дроблення, вузлів зчленування складок) цинково-свинцево-баритових гідротермальних руд, накладених на вмісні породи і руди першого типу. Вони супроводжуються ореолами навколорудних змінених порід. Цей тип родовищ виділено як атасуйський (Щерба и др., 1964). У межах УРР він має головне значення, включає родовища Ушкати́н, Жайрем, Бестюбе, Атабай-Дугулу та ін. (рис. 2).

Ушкати́нське рудне поле розташоване за 13 км на північному сході від селища Жайрем, у складноскладчастому вузлі на північному закінченні Жайльмінської синкліналі. Тут на площі 20 км² сконцентровані залізо-марганцеві поліметалічні родовища Ушкати́н-1 і Ушкати́н-3, марганцеві Ушкати́н-2 і Перстневське. Марганцеве зруденіння на площі рудного поля виявив у 1961 р. у процесі геологічної зйомки м-бу 1:50 000 О.І. Бузмаков, коли було відкрито родовище Ушкати́н-І. У 1962 р. Агадирська геофізична експедиція (О. А. Ігнатович та ін.) відкрила родовища Ушкати́н-ІІ та Ушкати́н-ІІІ. На родовищах з 1963 р. проводяться розвідувальні роботи. На родовищах Ушкати́нського рудного поля в межах однієї площі поєднані пластові тіла залізо-марганцевих руд, гідротермально-метасоматичні та гідротермально-осадові поліметалічні руди.

Родовище Ушкати́н-ІІІ розташоване за 2,5 км на південний захід від родовища Ушкати́н-І. Воно приурочене до вузької, глибокої синклінальної складки меридіонального простягання. Залізо-марганцеві руди локалізовані в західному крилі складки, барит-свинцеве зруденіння – у східному. Західне крило складки має нахил 70–90°, східне вертикальне і навіть перекинуто на захід. Зі сходу і півночі складка обмежена системою крутоспадних великоамплітудних розломів (рис. 3). І залізо-марганцеві, і барит-свинцеві руди приурочені до одного стратиграфічного горизонту – червонокольорової пачки (товщина 130 м) верхнього фамену (D_{3fm2b}), але різним фаціальним різновидам. Родовище формувалося на стику фацій мулових западин та фації органогенних вапняків (бар'єрного рифу).

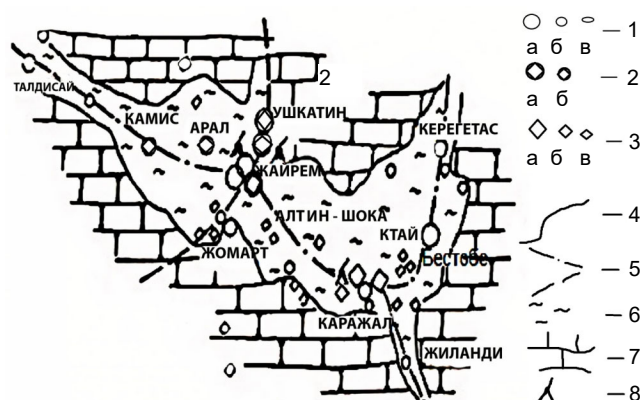


Рис. 2. Палеофаціальна схема фамену Атасуїського району і родовища атасуїського типу:

- 1 – поліметалічні родовища (а – великі, б – середні і дрібні, в – прояви); 2 – комплексні залізомарганцеві і поліметалічні родовища (а – великі, б – дрібні); 3 – залізомарганцеві родовища (а – великі, б – середні і дрібні, в – прояви); 4 – контур Жайльмінського палеорифту; 5 – вісь палеорифту; 6 – трансформний розлом; 7 – області накопичення глинисто-карбонатних осадів (а), органогенних вапняків (б); 8 – фаменські вулкани

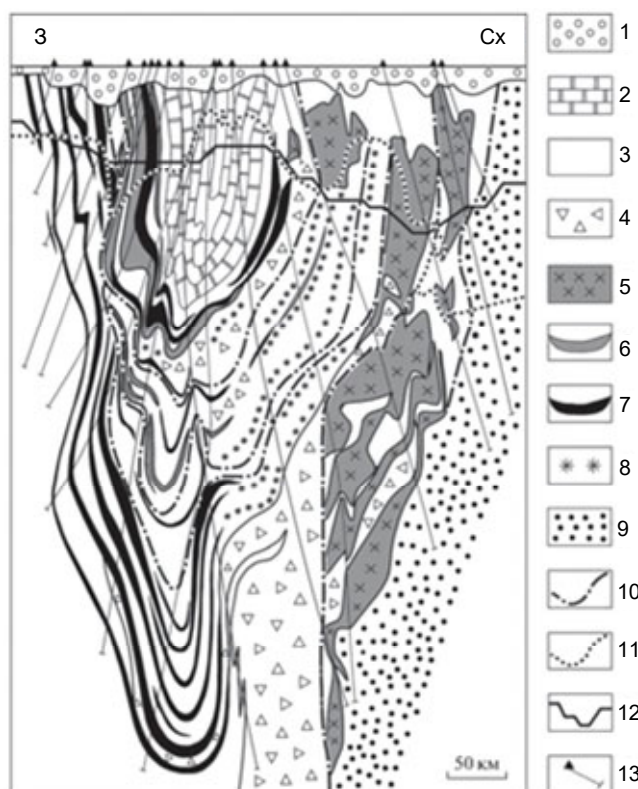


Рис. 3. Геологічний розріз родовища Ушкати́н-III (за матеріалами АТ "Жайремський ГЗК", 2011):

- 1 – пухкі відклади, піски, глини, суглинки (KZ); 2 – вапняки сірі хвилясто- та вузлувато-шаруваті (C₁t); 3 – вапняки сірі і червоні органогенно-детритові, тонкошаруваті (D₃fm₂); 4 – вапнякові брекчії вишнево-сірі та сіро-зелені з алевро-пелітовим цементом (D₃fm₂); 5 – рифові органогенно-водоростеві буро-червоні вапняки з прожилково-вкрапленим барит-свинцевим зруденінням; 6 – залізні руди; 7 – марганцеві руди; 8 – вапняки з тонкими прошарками марганцевих руд; 9 – алевроліти та пісковики вишневі (D₃ft); 10 – розривні порушення; 11 – нижня межа зони окиснення; 12 – профіль кар'єру (2010 р.); 13 – проєкції бурових свердловин

Західне крило рудовмісної синкліналі складене вузлувато-шаруватими червоними вапняками, вуглисто-глинистими вапняками, алевролітами з прошарками залізних і марганцевих руд. Поліметалічне зруденіння відмічається лише в підстильній сіробарвній пачці D₃fm₂ у вигляді прошарків і лінз мельниковіт-піриту і сфалериту (товщина 0,5–1,0 см). Східне крило складки складене дрібнокристалічними рожевими вапняками із хвилясто-шаруватою і стилітовою текстурою, які вміщують прожилкове і гніздове барит-свинцеве зруденіння гідротермально-метасоматичного генезису.

Поклад залізомарганцевих руд витягнутий у меридіональному напрямку на 1900 м за товщиною від 90 до 130 м. У покладі налічуються понад 20 пластовидібних і лінзоподібних рудних тіл, розділених безрудними вапняками. Товщина рудних пластів коливається від 1–2 до 25–40 м, товщина безрудних вапняків – від 0,5 до 30 м. Рудні пласти простежені за падінням від 50 до 600 м.

На родовищі виділяються такі типи руд: залізні, залізо-марганцеві та марганцеві. Для залізних руд характерний простий мінеральний склад, значна мінливість товщини пластів. Пласти залізних руд (товщина до 6–7 м) із

вмістом заліза до 50 % залягають у північній частині родовища. У напрямку на південь вони виклинюються і заміщуються марганцеворудними пластами. Марганцеві руди займають провідне положення на півдні родовища. Для них характерний складний мінеральний склад.

Залізомарганцеві руди на родовищі Ушкати́н-III поділяються на яcobситові та брауніто-гематитові. Вміст заліза і марганцю в цих рудах приблизно однаковий. Руди мають масивну, шарувату, плямисту, оолітову текстуру. Зустрічаються брекчієподібна та конкреційна текстури. На родовищі широко розвинена кора вивітрювання. Її нижня межа нерівна, з кишеньками. Товщина кори від 20 до 200 м, у середньому 90–100 м. Руди в корі вивітрювання окиснені. Основні рудні мінерали залізних руд: гематит і магнетит, марганцевих – брауніт, гаусманіт, у зоні окиснення – псиломелан, піролюзит, манганіт. У рудах є германій, у марганцевих рудах – талій, цинк. Родовище належить до вулканогенно-осадових з накладеним гідротермальним зруденінням.

Жайремське рудне поле розташоване на північному заході району і приурочене до однойменної антикліналі, яка ускладнена складками вищих порядків. У межах рудного поля розташовані поліметалічні родовища Східний Жайрем, Західний Жайрем і Далекозахідний Жайрем. Свинцево-цинкові руди родовищ

локалізовані у вуглисто-глинисто-кременистих вапняках нижньофаменського під'ярусу, частково – у сіробарвній пачці верхнього фамену (Східний Жайрем). Залізні руди родовищ Жайремського рудного поля не мають промислового значення через низькі вмісти заліза в рудах і малої товщини пластів. Найбільші запаси залізних руд приурочені до родовища Східний Жайрем, але вміст заліза тут у середньому 29 %. Ці руди у майбутньому, з розвитком технології збагачення, можуть перейти до розряду промислових.

Родовище Далекозахідний Жайрем приурочене до Далекозахідної брахісинклінальної складки. Довжина рудовмісної синкліналі близько 2 км, ширина 800 м. У її ядрі залягають вивітрілі вузлувато-шаруваті вапняки сіробарвної пачки верхнього фамену, крила складені вуглистими вапняками ритмічно-шаруватої флюїдної пачки нижнього фамену. У центральній частині родовище ускладнене крутоспадним скидом, що розділяє південний і північний рудні поклади (рис. 4). З поверхні родовище перекрите чохлом кайнозойських відкладів (товщина до 40 м). Свинцево-цинкові руди залягають у ритмічно-шаруватій та в нижній частині флюїдної пачок, пласт бідних залізних руд – у верхній частині флюїдної пачки в горизонті вузлувато-шаруватих вапняків ($D_3fm_1C_4$).

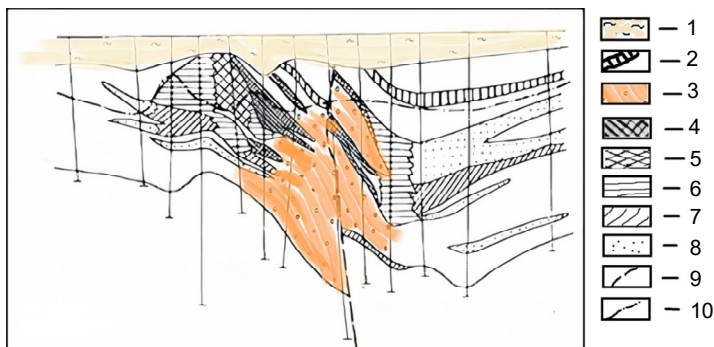


Рис. 4. Геологічний розріз родовища Далекозахідний Жайрем:

1 – глини, піски; 2 – горизонт залізних руд $D_3fm_1C_4$; 3 – кварцові і кварц-піритові метасоматити; 4 – баритові руди; 5 – свинцево-баритові руди; 6 – барит-свинцево-цинкові руди; 7 – свинцево-цинкові руди зі слабкою баритизацією; 8 – цинково-піритові руди; 9 – розривні порушення; 10 – границя кори вивітрювання

Виділено руди трьох етапів. Рудні тіла першого етапу представлені пластами цинкових (сфалерит-мельниковіт-піритових) руд, що утворюють пошарову вкрапленість і прошарки сульфідів (товщина від часток міліметру до 25 см). Вміст цинку зменшується від центру родовища до периферії. До другої групи входять тіла гідротермально-метасоматичних галеніт-баритових, баритових, кварц-баритових руд. Рудні тіла цього типу складно побудовані субзгідні, мають форму лінз, штоків, рудних стовпів. Третій тип представлений рудними жилами, що січуть руди як першого, так і другого етапу, складені мономінеральним галенітом, галеніт-баритовими і халькопірит-баритовими рудами. Чітко проявлена гідротермальна зональність, виділяються п'ять зон (від центру): 1) кременисто-баритова, 2) галеніт-баритова, 3) багатих свинцево-цинкових руд, 4) свинцево-цинкових руд, 5) первинних цинково-піритових руд.

На родовищі під час його формування існували два рудоконтролювальні центри і тому утворилися два окремих рудних поклади: східний та західний. Між ними залягають баритові руди, кварц-піритові, кварцові та альбіт-кварцові метасоматити. Горизонт гідротермальних осадових руд складений пластами сфалерит-піритових руд (товщина від 5 до 70 м). Він утворює смугу широтного простягання завширшки 800–900 м і завдовжки

2000 м. Найбільша товщина рудних тіл у центральній частині родовища – 130 м. У верхній частині родовища розвинена потужна кора вивітрювання, що досягає глибини 300 м. Свинцево-цинкові руди тут окиснені та складені церуситом і смітсонітом.

Другий тип (алайгирський) представлений родовищами свинцевої вулканогенно-гідротермальної формації, до якої належать 11 родовищ та рудопроявів, у тому числі родовище Алайгир. Вони локалізовані переважно в ріолітах, фельзитах та їх туфах живетьсько-франського ярусу, контролюються крутоспадними зонами дроблення у склепінних частинах брахіантиклінальних або вулканокупольних складок II і III порядків. Характерна наявність зон окварцованих та серицитизованих порід. Форма рудних тіл – крутоспадні, рідше пологозалежні лінзи в зонах дроблення. Поширеним рудним мінералом є галеніт, що асоціює з кварцом. Інші сульфідні (сфалерит, халькопірит, пірит) трапляються в різко підпорядкованій кількості. Рудні мінерали виділяються як вкрапленики у змінених породах.

Родовище Алайгир є найбільшим у межах Успенської тектонічної зони. Воно розташоване в центральній частині УРР, в зоні розвитку девонських і карбонових осадових і вулканічних формацій, прорваних

субвулканічними і дайковими інтрузіями. Головні стратиграфічні підрозділи (знизу):

- товща теригенно-карбонатних осадових порід девону;
- спіліт-кременисто-теригенні вулканогенно-осадові породи пізнього девону-раннього карбону;
- вугленосна формація візе;
- ріоліти пізньовізейсько-серпухівського віку;
- сублужні ріоліти ранньопермського віку, що утворюють великі субвулканічні тіла та інтрузії.

Основною структурою Алайгирського рудного поля є стисла брахіантиклінальна складка субширотного простягання. У крилах антиклінали породи мають круте ($65\text{--}85^\circ$) падіння, місцями відзначається перекидання крил на північ і на південь. Субвулканічне тіло ріолітів, де локалізоване свинцеве зруденіння, розташоване в північному крилі цієї структури. У межах родовища породи мають моноклінальне залягання з падінням на північ і північний захід, ускладнене складками вищого порядку. Простягання порід змінюється від північно-східного на західному фланзі родовища до східного на Східній ділянці з кутами падіння від 40° до 85° , іноді встановлюється перекинута на південь ($80\text{--}85^\circ$) залягання.

Найдавнішими розривними порушеннями, що ускладнюють складчасту структуру, є згідні поздовжні (субширотні) порушення типу насувів або міжпластових зривів. Порушення цього типу характерні для всієї Успенської зони зминання. Близькими до них за типом є системи поздовжніх внутрішньопластових зон дроблення і тріщинуватості в субвулканічному тілі ріолітів. Молодшими у межах рудного поля є порушення типу скидо-зсувів північно-східного та північно-західного простягання. До порушень цього типу приурочені дайки діоритів і діабазів. Інтрузивні утворення представлені герцинськими гранітоїдами з підпорядкованим розвитком проміжних та мафічних інтрузій. Виділяють три стадії інтрузивного магматизму:

- ранньогерцинська – невеликі мафічні масиви у південно-західній частині родовища, складені велико- та середньозернистими габродіоритами, гранодіоритами та кварцовими діоритами;
- середньогерцинська – діорити, ріоліти, гранодіорити, що формують невеликі штокоподібні масиви;
- пізньогерцинська – широко розвинені в районі масиви лейкократових дрібно- і середньозернистих гранітів і граніт-порфірів, біотитових і біотит-роговообманкових гранітів, що проривають палеозойську вулканогенно-осадову товщу, часто приурочені до зони субмеридіонального Успенського розлому.

Рудовмісні породи зазнали гідротермально-метасоматичних змін; виділяють три фації: пропілітову, калішпатову та березитову. Рудні тіла родовища тісно пов'язані з пластовими субвулканічними тілами ріолітів, конформними іншим стратиграфічним підрозділам.

Рудне поле родовища складене ефузивно-пірокластичною товщею девону ($D_2\text{--}D_3$). У комплексі вулканогенно-осадових порід фамену виділено дайкоподібні тіла субвулканічних ріолітів, що займають згідне і січне положення. Відомі невеликі дайки порфіритів. У безпосередній близькості від родовища є два великі гранітні масиви. Родовище локалізоване у субвулканічному тілі ріолітів. Оскільки рудна мінералізація за простяганням має перерви, родовище умовно поділено на три ділянки: Західну, Середню та Східну.

На Західній ділянці основна рудна зона представлена безперервним розгалуженим рудним тілом і серією невеликих паралельних лінз і жиліподібних тіл, що залягають згідно з ріолітами (рис. 5). Поворот блоків по шарнірах поперечних скидо-зсувів зумовив відмінність у

падінні рудних тіл – від субвертикального на Західній ділянці ($70\text{--}85^\circ$) до відносно пологого на Східній ($30\text{--}35^\circ$).

Внутрішня будова окремих рудних тіл досить складна. Ділянки бідного вкрапленого зруденіння поєднуються з прожилками, гніздами та більшими відособленнями багатих руд та суцільних сульфідів. На глибині рудні тіла мають ще складнішу будову, розпадаючись на систему зближених тіл різної потужності. У загальній своїй масі вони є мономінеральними, галенітовими і лише в деяких випадках набувають пірит-галенітовий або сфалерит-галенітовий склад. Рудні тіла оточені широкими ореолами розсіювання свинцю, барію, срібла, менше міді, цинку та ін. Зруденіння локалізоване в межах товщі ефузивних ріолітів та їх туфів, де контролюється зонами дроблення і підвищеної тріщинуватості. За інтенсивністю зруденіння виділяється основна рудна зона, відносно потужна і витримана, яка супроводжується паралельними зонами з менш інтенсивним зруденінням.

Основна зона тяжіє до лежачого боку ріолітів. Ближче до висячого боку, паралельно їй, проходить Північна рудна зона. Вона відокремлена від Південної лінзоподібними прошарками туфів та карбонатних порід. Поблизу лежачого боку, особливо у глибоких горизонтах, відзначаються невитримані, часто сліпі рудні тіла (Західна ділянка). На всьому протязі рудні тіла розташовані кулісоподібно, групуються в паралельні зони, місцями вони зближені, місцями розходяться. Загалом рудоносна смуга в ріолітах має довжину близько 3 км.

На родовищі виділено три типи руд: сульфідні, змішані та окиснені. Переважають сульфідні руди, основна частка запасів яких становить 59 %. Основним мінералом-носієм є галеніт, з яким пов'язано понад 85 % свинцю, з незначними домішками піриту, халькопіриту та сфалериту. Змішані руди становлять 15,5 % від загальних запасів руди. Основні рудні мінерали представлені галенітом і церуситом.

Окиснені руди становлять 25,5 % від загальних запасів, залягають у верхніх частинах рудної зони, складені переважно церуситом. Зона окиснення розвинена нерівномірно. Її глибина змінюється від 50 до 220 м на Західній ділянці і від 80 до 190 м на Східній, досягаючи максимальних значень у центральній частині родовища. Межі зони окиснення із сульфідною рудою дуже нерівні і нечіткі, зазвичай ідентифікуються лише за результатами фазового аналізу. Окиснена зона характеризується інтенсивним розвитком псевдопорфірового церуситу та підпорядкованою кількістю англезиту після галеніту. Галеніт трапляється у вигляді реліктових сегрегацій і дрібних частинок у церуситі. Перехідна зона характеризується частковим заміщенням галеніту церуситом, англезитом; часто являє собою сульфідні агрегати із зонами підвищеної тріщинуватості, де вона складається з окиснених мінералів свинцю і гідроксидів заліза.

За даними хімічного складу виявлено, що літофільні компоненти у складі всіх типів руд родовища істотно переважають над рудними. Основним з них є кремнезем, вміст якого становить 68,8–72,5 %. Частка інших літофільних компонентів варіює у широкому діапазоні. З них переважають алюміній та калій (5,15–7,3 % та 2,62–6,93 % відповідно). Рудні елементи представлені залізом, свинцем, цинком (табл. 2).

Вікові співвідношення зруденіння з інтрузивним і дайковим комплексами порід, його великий вертикальний діапазон у разі сталості речовинного складу руд дають змогу припускати, що джерелом гідротермальних рудоносних розчинів були глибинні магматичні осередки або серії малих інтрузій, імовірно пов'язаних з осередками

попереднього вулканізму, які активізувалися за умови посилення тектонічних процесів. Просторова приуроченість зруденіння до вулканогенних утворень, мабуть, зумовлена тим, що рудоносні розчини використовували як

підвідні канали тріщинної структури вулканічного апарату. Крім того, велика хімічна активність кислих ефузивів на родовищі, їх фізико-механічні властивості за наявності сприятливої структури створили умови рудовідкладення.

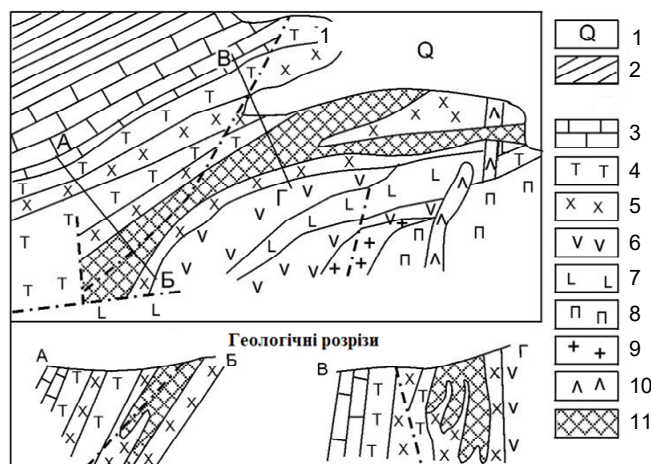


Рис. 5. Схематичний геологічний план і геологічні розрізи Західної ділянки родовища Алайгир:

1 – четвертинні відклади; 2 – фаменські сланці, туфопісковики, вапняки; 3–8 – живетьсько-франські відклади: піщаністі вапняки (3), туфи ріолітів (4), ріоліти (5), альбітофіри (6), туфіти (7), порфіроїди (8); 9 – субвулканічні ріоліти; 10 – порфірові дайки діоритів; 11 – рудні тіла

Таблиця 2

Хімічний склад руд							
Компонент	Сульфідні руди	Змішані руди	Окиснені руди	Компонент	Сульфідні руди	Змішані руди	Окиснені руди
SiO ₂ , %	67,84	68,91	70,32	Se, г/т	<5	<5	<5
TiO ₂ , %	0,19	0,19	0,25	Cd, г/т	<10–20	н/визн.	<10
Al ₂ O ₃ , %	11,33	10,8	12,19	Te, г/т	<2	<1	<2,0–3,9
Fe ₂ O ₃ , %	2,22	1,72	1,86	Hg, г/т	1,67	4,22	0,88
MnO, %	0,06	0,03	0,05	Sb, г/т	<20–37	47	30
MgO, %	0,41	0,27	0,45	Ga, г/т	137	15	17
CaO, %	2,12	0,80	0,44	Ge, г/т	2,0	н/визн.	1,0–1,1
Na ₂ O, %	0,54	0,34	0,29	Au, г/т	–	–	–
K ₂ O, %	7,50	7,41	8,60	F, г/т	0,05–0,2	н/визн.	0,05
P ₂ O ₅ , %	0,042	0,0042	0,055	As, г/т	<50	50	<50–85
Pb, %	2,66	4,05	2,13	In, г/т	<0,001	<0,5	<1,0
Zn, %	0,099	0,06	0,023	Re, г/т	<0,04	<0,04	<0,04
Cu, %	0,013	0,011	0,028	Tl, г/т	1,40	1,32	1,57
BaSO ₄ , %	1,37	3,38	1,42	Co, г/т	<40	н/визн.	<40
S, %	1,13	0,82	0,40	Ni, г/т	16,0	12,0	11,0
Ag, г/т	14,4	21,59	10,73	Сума	97,52	98,83	98,51

Фактори контролю зруденіння УРР. Основними чинниками контролю зруденіння УРР є структурні, магматичні, метасоматичні і літолого-стратиграфічні.

Глобальним структурним фактором є приуроченість УРР до енсиматичних та енсальних островодужних палеосистем Казахстану, що відображає загальнопланетарну закономірність у розподілі родовищ корисних копалин (Мазуров, 2005; Металлогения Казахстана..., 1983; Митчел, Гарсон, 1984).

Регіональним структурним фактором є наявність Успенської ослабленої зони, яка є дуже давньою і сформувалася вздовж тих глибинних розломів, зародження та розвиток яких зумовило появу ділянок земної кори, що зазнавали у подальшому складних перетворень. Ці розломи послужили підводними каналами для вкорінення магми, про що свідчать численні тіла інтрузивних порід і ефузивні утворення, поширені в їх межах. Крім того, ці розломи значно послабили міцність зчленування окремих частин давнього фундаменту складчастої області. Тому надалі саме вздовж них найбільш інтенсивно проявилися тектонічні напруження, що зумовили виникнення густої мережі додаткових розломів і дрібних

тріщин. Одночасно відбувалося інтенсивне стиснення, що привело до утворення складних складчастих і розривних порушень і стало сприятливою умовою виникнення поліметалічних родовищ.

Рудоносні формації складені доломітами, вапняками з горизонтами вуглецево-глинистих, вуглецево-кременистих порід, яшм, алевролітів і туфітів. Епізодично в них фіксуються висококалієві вулканіти базальт-трахібазальтового складу та дрібні габро-сієнітові інтрузії. У розрізах продуктивних товщ закономірне положення свинцево-цинкових горизонтів нижче залізних та марганцевих. Руди свинцево-цинкових родовищ значно цинкові. Сумарні вмісти свинцю та цинку близько 4 %. Збагачення (до 7–8 %) пов'язане з перетворенням стратиформних руд у зонах метасоматичної переробки (Жайрем), тектоно-метаморфізму (Текелі) та в надінтрузивних областях із заповненням багатими рудами термокарстів (Акжал). До континентальних рифтів приурочені найбільші на Євразійському континенті скупчення марганцевих руд Атасуйського району (Ушкати-III, Західний Каражал) (Рузаев, 2005).

Гідротермальне рудовідкладення в переважній більшості випадків випереджалось, супроводжувалося і завершувалося змінами вмісних порід. Так, на родовищі Жайрем навколорудні зміни вмісних порід проявилися тільки у зв'язку з гідротермальним етапом мінералоутворення. Початок гідротермального процесу супроводжувався інтенсивною переробкою вмісних порід. Проникнення перших порцій розчинів через вуглецево-глинисто-кременисті вапняки спричинило їхнє перетворення: виникали зони змінних порід, що частково перекривають одна одну. Це зони освітлених і перекристалізованих вапняків, альбітизованих вапняків, альбіт-доломітових порід, кременистих метасоматитів. Мало місце одночасне утворення зон, що супроводжувалося розростанням і частковим їх накладенням одна на одну.

Кварцові, пірит-кварцові та баритові метасоматити, які утворилися в наступні стадії процесу, розділені тектонічними порушеннями. Одночасно відбувалося заповнення тріщин та порожнин. Найбільш інтенсивно проявилася баритизація, що призвела до утворення на порівняно великих площах баритизованих порід і баритових метасоматитів. Незначно їй поступається окварчування, у той час як альбітизація та доломітизація проявлені локально.

На родовищі Ушкати-III навколорудні зміни проявлені слабо. Баритизація розвинена лише у зонах диз'юнктивних порушень. Близькі до описаних і навколорудні зміни вмісних порід на родовищах кварц-баритової гідротермально-метасоматичної субформації.

Отже, для цих родовищ найтипівшими навколорудними змінами є окварчування та баритизація. На родовищі свинцевої вулканогенно-гідротермальної формації Алайгир навколорудним змінам піддаються в основному рудовмісні ефузиви (ріоліти, фельзити та їх туфи).

В Україні свинцево-цинкові руди відомі в південно-східній частині Дніпровсько-Донецької западини і в Закарпатті. У Державному балансі запасів корисних копалин України обліковано запаси Берегівського, Мужіївського, Біганського комплексних родовищ, станом на 01.01.2020 р. розробляється Біганське (спеціальний дозвіл на видобування баритових руд із супутнім вилученням поліметалів та срібла) (Мінеральні ресурси України..., 2020).

До Карпатської металогенічної провінції входять Закарпатський внутрішній прогин, складчасті Карпати і Передкарпатський крайовий прогин. В її межах основна маса гідротермальних родовищ і перспективних рудопоясів свинцю і цинку локалізується в Закарпатському внутрішньому прогині і пов'язана з альпійським вулканізмом андезитацит-ріолітової формації.

Комплексні золото-поліметалічні родовища, пов'язані з неогеновим вулканізмом, відомі в обрамленні Паннонського масиву не тільки в Україні, але й в Румунії (рудні райони Бая-де-Арієш, Секаримб і Брад) і в Словаччині (рудні райони Кремниця і Пуканець). Всі об'єкти мають ряд подібних рис (рис. 6): двоярусну будову з ефузивно-осадовим чи карбонатно-теригенним донеогеновим фундаментом, перекритим андезит-ріолітовими вулканітами неогену, з численними екструзіями, неками, жерловинами, субвулканічними інтрузіями кислого складу, які часто контролюють розміщення рудних тіл (родовища Мазарі, Ха-неш, Бая-Спріє, Хержа, Валня-Рошіє, Нариаг в Румунії); зональність зруденіння з внутрішніми зонами з Cu-Pb-Zn мінералізацією і зовнішніми з Au-Ag; вертикальну протяжність зруденіння до 500–800 м (Апусені, Бая-Спріє, Рошеа-Монтана); рудні тіла представлені малосульфідними кварцовими і кварц-адуляровими жилами, кварцовими брекчіями, каолініт-кварцовими прожилково-вкрапленими зонами, локалізованими в системах рудоносних тріщин в окременілих, пропілітизованих і піритизованих породах. Вони належать до золото-адуляр-кварц-халцедонової малоглибинної формації, характеризуються високим вмістом срібла (Au:Ag – 1:3) і відносно низькою пробністю золота (600–800).

Так, на рудному полі Штявниця-Годруша в Центральній Словаччині внутрішня зона (Штявниця) представлена жилами поліметалічної (Cu, Pb, Zn) формації, локалізованими в андезитах неогену, а також прожилково-вкрапленими гідротермально-метасоматичними рудними зонами в тріасових мергельно-карбонатних породах, а зовнішня (Годруш) – срібло-золотоносною зоною. Золотоносні, часто із сріблом і стибнітом кварцові жили значно поширені також на рудних полях Кремниця, Нова Бая, Пуканець у Центральній Словаччині.

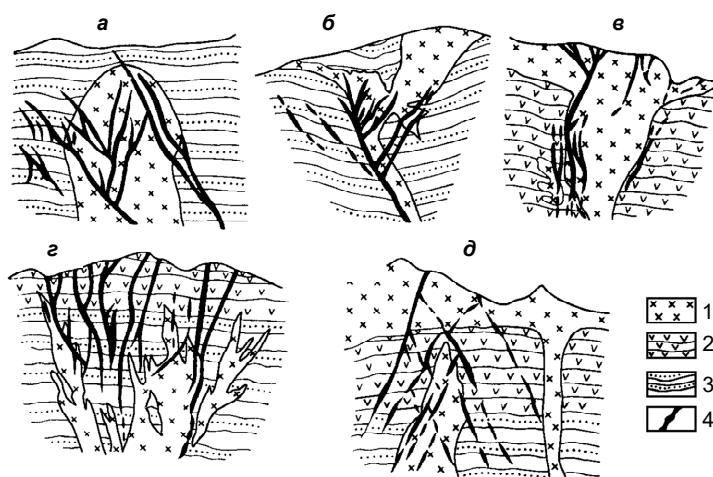


Рис. 6. Схеми будови золото-поліметалічних родовищ Румунії (Михайлов, Федчук, 2008):

Родовища: а – Мазарі, б – Ханеш, в – Бая-Спріє, г – Хержа, д – Валея-Роше;

1 – субвулканічні тіла кислого і середнього складу; 2 – вмісні вулканогенні (а) і осадові (б) породи; 3 – рудні тіла

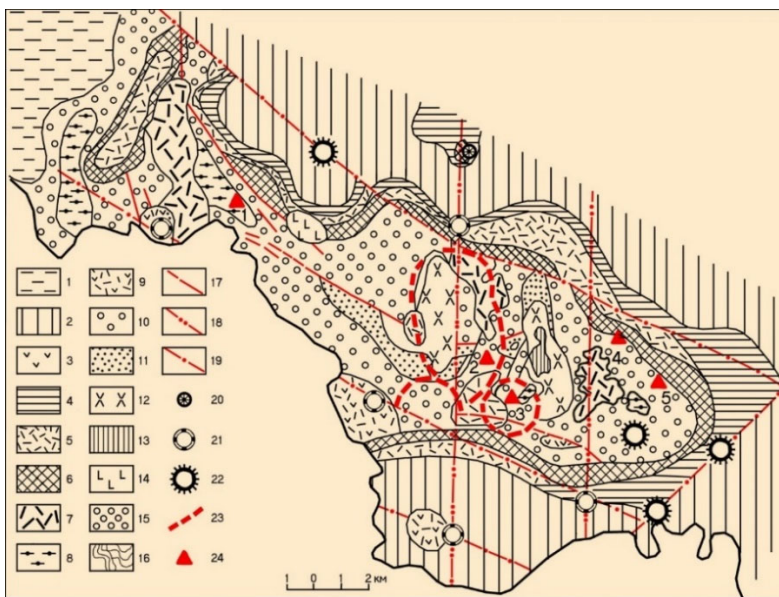


Рис. 7. Геологічна карта Берегівського рудного району (Гурський та ін., 2006):

- 1 – глини, піски ільницької світи левантину; 2 – глини з прошарками пісковиків кожелівської та ізовської світи паннону;
 3 – пліоценові андезити; 4 – глини, піски, мергелі алмаської світи середнього сармату;
 5–6 – туфи (5) і аргіліти (6) лувської світи нижнього сармату; 7 – ріоліти; 8 – ігнімбрити; 9 – лави і туфи андезитів і ріолітів;
 10 – верхній туфовий горизонт нижнього сармату; 11 – верхня осадова товща нижнього сармату;
 12 – середній туфовий горизонт середнього баденію; 13 – нижня осадова товща гелвету і нижнього баденію;
 14 – нижній туфовий горизонт карпатію; 15 – конгломерати і гравеліти буркалівської світи; 16 – складки;
 17–19 – розломи, що контролюють прояви ріолітового вулканізму (17), андезитового вулканізму (18), наскрізні (19);
 20–22 – вулкани андезитові (20), змішаного складу (21), ріолітові (22); 23 – кальдери;
 24 – родовища і рудопрояви (1 – Біганське, 2 – Берегівське, 3 – Мужіївське, 4 – Лопоське, 5 – Квасовське)

Берегівський рудний район розташований у південній частині Закарпатської області на північному сході Придунайської низовини (рис. 7). Площа рудного району збігається з Берегівськими нагір'ями, що становлять собою невисокі вулканічні островні гори серед рівнини. Сучасна структура району зумовлена тектонічними рухами, які відбувалися в пліоцені в період формування Великої Угорської западини і горстової зони. В районі бурінням розкриті породи донеогенового фундаменту (палеозойські філіти, вапняки і тріас-юрські вапняки, діабази, яшми). Неоген представлений осадово-вулканогенною товщею, що складається з перешаровування горизонтів ріолітових туфів і піщано-глинистих порід.

Вся товща зім'ята в брахіскладки субмеридіонального простягання і розбита на окремі блоки розломами різних напрямків і амплітуд. У Берегівському рудному районі розвідані родовища алуніту, каоліну, барит-поліметалічних руд, розробляються золото-поліметалічні руди. В межах району виділяють три рудних поля: Біганське з однойменним срібло-поліметалічним родовищем; Берегівське з Берегівським і Мужіївським золото-поліметалічними родовищами; Квасівське з Квасівським і Лопосанським срібло-поліметалічними і Келчейським золото-поліметалічним рудопроявами (рис. 8).

Берегівське золото-поліметалічне родовище приурочене до південного замикання субмеридіонального брахіантиклінального підняття і розташоване в однойменній кальдері, складеній міоценовими туфами ріолітів. Рудні тіла в межах родовища локалізовані переважно в туфогенній товщі неогену. Основним рудовмісним горизонтом служать ріолітові туфи середньої частини розрізу, частково зруденіння зустрічається в нижній частині осадової товщі. Порооди розсічені двома системами тріщин, різних за напрямом і віком. Перша

система має захід-північно-західне простягання і з нею пов'язана золото-поліметалічна мінералізація. Друга система – північ-північно-східна – перетинає поліметалічні жили і з нею пов'язане утворення каолінових і алунітових покладів (рис. 9).

Золото-поліметалічна мінералізація представлена чотирма морфологічними типами рудних тіл: 1) складно побудовані рудні жили і жильні зони в розломах північно-західного і північно-східного напрямків; 2) прожилково-вкраплене зруденіння в зонах підвищеної тріщинуватості; 3) субпластові тіла в шаруватих вулканогенно-осадових відкладах; 4) рудні штокверки на ділянках підвищеної тріщинуватості. Січні і згідні кварц-сульфідні жили і прожилково-вкраплені рудні тіла (товщина до 3–5 м, довжина 350–450 м) простягаються до глибини 350 м.

Мінеральний склад руд родовища досить різноманітний, їхню загальну мінералогічну характеристику наведено в табл. 3. Основні рудні мінерали: сфалерит, пірит, галеніт, марказит, халькопірит; другорядні: гематит, тетраедрит, золото, срібло, електрум, вюрцит, мельниковіт. На верхніх горизонтах більше поширені барит, марказит, мельниковіт. Значно частіше тут трапляється і золото, особливо в штокверкоподібних кварц-адулярових метасоматитах у вигляді вільних зерен розміром 1 мм в поперечнику.

Вміст металів у рудній зоні змінюється в горизонтальному і вертикальному напрямках. Середній вміст суми свинцю і цинку у штокверковому зруденінні на флангах менший, ніж у її центральній частині. З глибиною збільшується кількісне співвідношення сфалериту до галеніту, суми свинцю і цинку до золота і срібла. Останні містяться в рудах в прямо пропорційній залежності від зміни вмісту свинцю і цинку. Вміст свинцю в середньому по рудній зоні становить 2,09%, цинку – 5,08 %. Відзначено високий вміст кадмію, низький сурми і миш'яку.

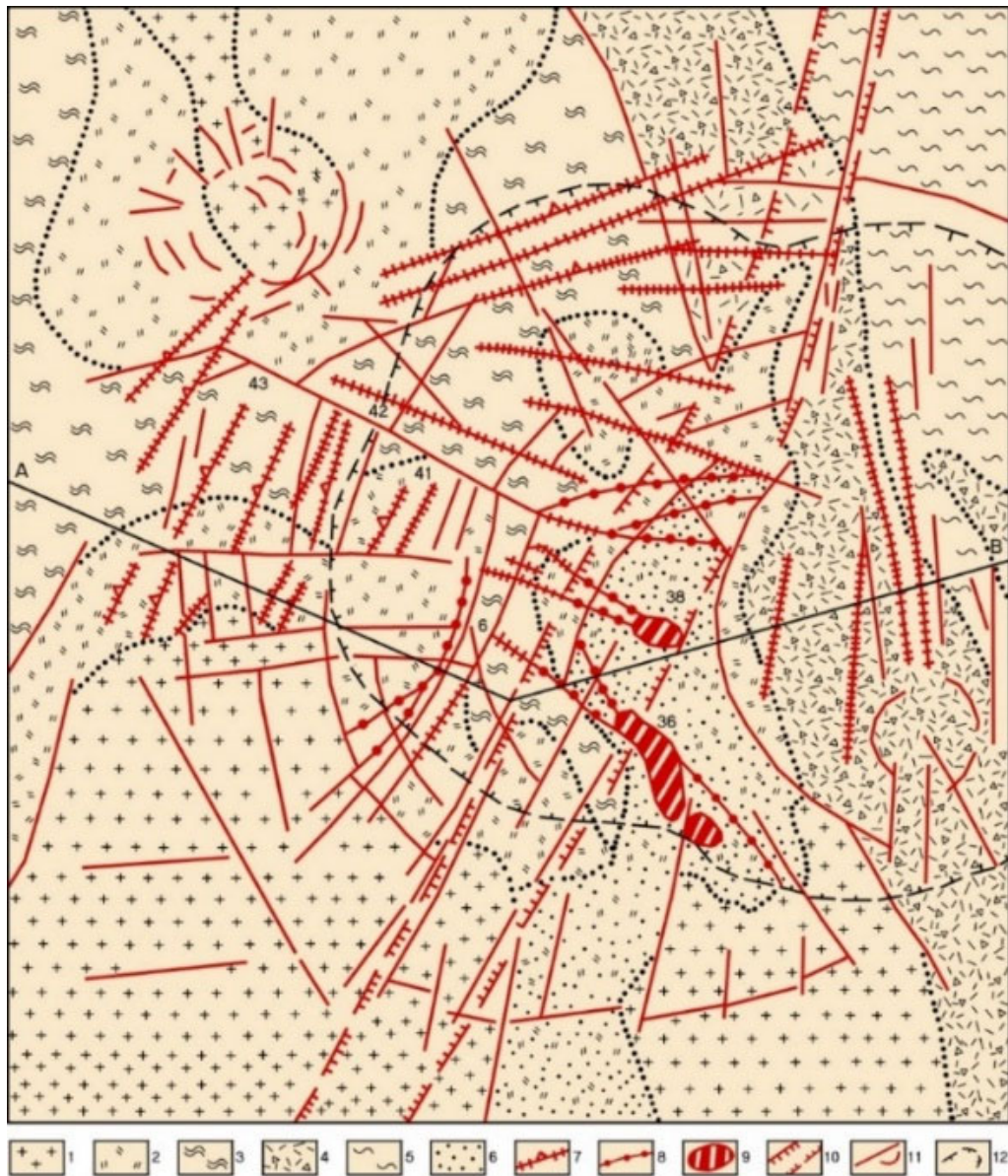


Рис. 8. Схематична геологічна карта Берегівського рудного поля (Гурський та ін., 2006):
 1 – ріоліти; 2 – верхня туфова товща; 3 – верхня осадова товща; 4 – середня туфова товща; 5 – нижня осадова товща;
 6 – вторинні кварцити; 7 – слабо мінералізовані розломні зони; 8 – рудні зони; 9 – штокверкові рудні тіла;
 10 – Діагональна розломна зона; 11 – радіальні і кільцеві розломи; 12 – інтрузія мікрогранодіориту на глибині

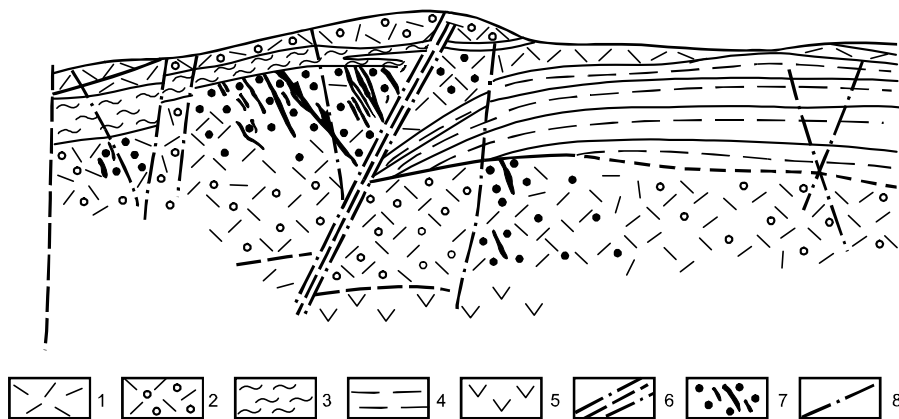


Рис. 9. Розріз Берегівського родовища (Михайлов та ін., 2007):
 1 – ріоліти, 2 – туфи ріолітів нижнього горизонту, 3 – аргіліти верхньої осадової товщі, 4 – аргіліти нижньої осадової товщі,
 5 – вулканогенно-осадові утворення мезозою, 6 – зона Мужіївського розлому, 7 – рудні тіла, 8 – розломи

Таблиця 3

Мінеральний склад руд Берегівського родовища (Зацixa и др., 1984)

Рудні мінерали			Нерудні мінерали	Гіпергенні мінерали
Головні	Другорядні	Рідкісні		
сфалерит, пірит, марказит, халькопірит	гематит, тетраедрит, золото, срібло, електрум, вюрцит, мельниковіт	полібазит, бурноніт, халькозин, піраргірит, енаргіт, кіновар, фрейслебеніт, овіхіт	кварц, каолініт, барит, адуляр, монтморилоніт, альбіт, кальцит, сидерит, дикіт, гідрослюди, нонтроніт, гармотом, натроліт, доломіт	англезит, лімоніт, церусит, ярозит, халцедон, смітсоніт, ковелін, азурит, малахіт, сірка, гіпс, бронантит, куприт

Виділено чотири стадії мінералоутворення: 1) сульфідна (вкраплені руди): піротин, карбонат, пірит+марказит, сфалерит, галеніт, сульфосолі срібла, халькопірит, тенантит, електрум; 2) кварц-баритова (масивні баритові і кварц-баритові жили): флюорит, кварц I, барит I, англезит+пірит; 3) кварц-карбонатна (карбонатні і кварцові жили і прожилки): карбонат II, кварц II, гематит, кварц III, срібло, акантит, барит II; 4) карбонат-гетитова (карбонатно-кварцові, аметистові, кварц-халцедонові прожилки, ярозит-гематитові та баритові агрегати): карбонат III,

кварц IV, ярозит, гематит, золото, кіновар, барит III. Золото відкладалося наприкінці 1 стадії і в середині 4.

Багатостадійний процес формування руд, що супроводжувався зональним розподілом мінералів, новим відкриттям тріщин і дробленням раніше відкладених мінералів, а також процеси окиснення і вивітрювання зумовили наявність на родовищі різноманітних морфологічних типів текстур і структур руд, які наведено в табл. 4. Певному типу текстур і структур руд властива визначена мінеральна асоціація.

Таблиця 4

Генетичні типи текстур і структур руд Берегівського родовища (Зацixa и др., 1984)

Текстури		Структури	
Ендегенні	Екзогенні	Первинні	Вторинні
Виповнення порожнин (сфалерит, галеніт, кварц, пірит, марказит): прожилкова, смугаста, вкраплена, кокардова, друзова, масивна, коломорфно-метаколоїдна	Вилугоування (пірит, сфалерит, гематит, кварц, гідроксиди Fe і Mn): уламкова, порошокувата, вохриста, губчаста, ящикова	Зернисті (кварц, пірит, галеніт, халькопірит, сфалерит, золото, тетраедрит): ідіоморфно-і гіпідіоморфнозерниста, порфіроподібна, пойкилітова	Розпад твердого розчину (халькопірит, піротин, сфалерит, кубаніт): емульсійна, пластинчаста, зональна
Корозійні (сфалерит, галеніт, пірит, кварц): прожилкова, субграфічна, вкраплена, облямування	Корозійні (ковелін, смітсоніт, церусит, англезит, гематит): облямування, зональна, реліктова	Корозійні (сфалерит, галеніт, кварц, пірит): субграфічна, роз'їдання, залишкова від заміщення Метасоматичні (сфалерит, галеніт, пірит, кварц): ідіоморфно-і гіпідіоморфнозернисті	Метаколоїдні (сфалерит, вюрцит, галеніт, халькопірит): промениста, концентрично-зональна
Дроблення (сфалерит, пірит, галеніт): брекчієподібна		Колоїдні (сфалерит, галеніт, вюрцит, марказит, мельниковіт); коломорфна, скелетна	Катакластичні (пірит, галеніт, сфалерит, халькопірит), зім'яття, дроблення

Навколорудно змінені породи родовища належать до формації низькотемпературних вторинних кварцитів, накладених на регіонально-метаморфічні пропіліти (Щербань и др., 1988). Розвинена як горизонтальна, так і вертикальна зональність (зверху): монокварц-алуніт-каолініт(дикіт)-гідрослюди-монтморилоніт(ово)-калішплатова і альбітова зони. Вертикальній зональності метасоматитів відповідає рудна зональність – до верхніх зон розвитку кварцу, алуніту, глинистих мінералів приурочена золота мінералізація, а до зон альбіт-кварцових і адуляр-кварцових метасоматитів – свинцево-цинкове зруденіння.

Зона окиснення на родовищі розвинена досить нерівномірно, її потужність залежить від потужності пачки аргілітів, нижче якої залягають сульфідні руди. Пачка аргілітів є водотривом, який контролював проникнення на глибину кисню атмосфери і ґрунтових вод і в якому потужність зони окиснення різко зменшується (10–15 м). Зона окиснення проникає на значні глибини (до 250 м).

Рудні мінерали кварц-сульфідних жил замінюються вторинними мінералами з утворенням своєрідних текстур заміщення. Під час інтенсивного окиснення і вилугоування сфалериту утворюються ящикові і каркасні текстури лімоніту. У вкраплених рудах на місці гнізд сульфідів утворюються сипкі агрегати дрібних кристалів англезиту, ярозиту, гіпсу, малахіту. У кварц-адулярових породах, де переважає халькопірит, зустрічаються новоутворення ковеліну, азуриту, малахіту, куприту.

Берегівське родовище належить до золото-поліметалічної рудної формації, головні корисні компоненти свинець, цинк, золото і срібло. Мінеральний склад руд досить різноманітний, виділяють такі мінеральні типи: золото-пірит-галеніт-сфалеритовий, золото-кварц-гематитовий, золото-адуляр-кварцовий, золото-срібло-барит-гідрослюди-стий. Генетичний тип родовища – вулканогенний гідротермальний. Запаси алунітових руд становлять 51,4 млн т. Сума вмісту Pb і Zn – 4,1–13,6 %, Au 1 г/т, Ag 20 г/т. Відношення Zn/Pb 2:1. Запаси свинцю за категорією C₁ сягають 5,41 тис. т, прогнозні ресурси за категорією P₁ – 298,8 тис. т, P₂ – 44,0 тис. т; запаси цинку за категорією C₁ – 14,4 тис. т, прогнозні ресурси за категорією P₁ – 726,8 тис. т, за категорією P₂ – 106 тис. т (Гурський, 2008).

Біганське родовище комплексних алуніт-барит-поліметалічних руд має подібну будову. Воно локалізоване у прожилково-жилній зоні завширшки 200–250 м (рис. 10), у якій виділяють локальні рудні зони (Травнева, Вереснева, Жовтнева, Старо- і Новоквітнева, Безіменна) протяжністю до 1950 м за простяганням і до 600 м за падінням (товщина від 7–10 до 20–25 м). Середній вміст цинку в руді 3,83 %, свинцю – 1,22 %. Зруденіння належить до золото-поліметалічної рудної формації з мінеральними типами: баритовим з домішкою сульфідів – на верхніх горизонтах; золото-барит-галеніт-сфалеритовим і золото-кварц-адуляровим – на середніх; золото-пірит-галеніт-сфалеритовим і золото-кварц-гематитовим – на нижніх.

Родовище є комплексним алуїт-барит-золото-срібло-свинцево-цинковим, характеризується чітко вираженою вертикальною зональністю. Верхня частина складена окварцованими, алуїтизованими, каолінізованими ріолітовими туфами. Серед них виділяються пластові поклади алуїту завтовшки від 1–2 до 200 м, завдовжки 500–2000 м. Середній вміст алуїту сягає 35,0 %, запаси за категоріями C_1+C_2 195 млн т алуїтових руд (Гурський та ін., 2006). Рудні жили і зони тут мають переважно баритовий склад (16–70 % бариту, у середньому 33,5 %), головні мінерали: барит, кварц, каолінит, гематит, ферригалуазит.

На глибинах 130–180 м серед баритових руд з'являються сульфідні – галеніт, сфалерит, пірит, марказит, якими складені змішані барит-поліметалічні руди

середньої зони з високим вмістом срібла (до 50–250 г/т). Запаси баритових руд ($B+C_1$) становлять 4,1 млн т, запаси срібла значні.

Нижче поширені поліметалічні руди з піритом, марказитом, сфалеритом, галенітом, халькопіритом, бляклими рудами, халькозином, ковеліном, піраргіритом, пруститом, аргентитом, гринокітом. Вміст срібла сягає до 300 г/т, золота – до 0,5–1,6 г/т. Запаси становлять 501,3 тис. т (цинку – 381,1 тис. т за середнього вмісту 3,83 %, свинцю – 120,2 тис. т за середнього вмісту 1,22 %) (Гурський та ін., 2006). Прогнозні ресурси свинцю і цинку можуть сягати 1 млн т за рахунок флангів і глибоких горизонтів родовища, золота (як супутнього компоненту) – кілька десятків тонн.

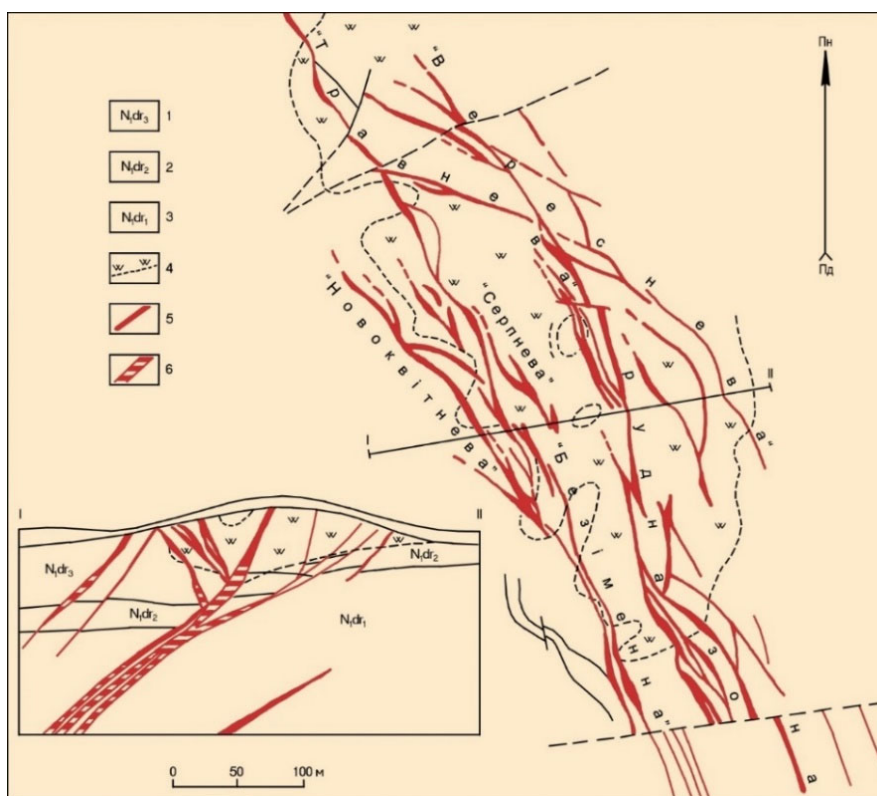


Рис. 10. Геологічна схема і розріз Біганського родовища (Сасюк, 2001):

1–3 – доробратівська світа: 1 – верхній горизонт: ріолітові туфи, ксенотуфи; 2 – середній горизонт: аргіліти, алевроліти, пісковики, туфити, туфопісковики з прошарками ріолітових туфів; 3 – нижній горизонт: ріолітові туфи; 4 – вторинні кварцити; 5–6 – зруденіння (5 – баритове; 6 – поліметалічне)

Мужіївське родовище характеризується двоярусною будовою. Нижній ярус складений серією крутоспадних сульфідних, кварц-сульфідних, кварц-баритових і кварцових жил і прожилків завтовшки від 0,5 до 50 м (найчастіше 1–5 м) протяжністю до 600–1300 м з прожилково-вкрапленою поліметалічною і супутньою срібною і золотою мінералізацією. Верхній ярус (на глибині 60–150 м) представлений амебоподібним штокверком (50×50 м) тонковкрапленої золотої мінералізації серед метасоматитів формації вторинних кварцитів і аргілізитів по туфах і брекчіях неогенових ріолітів (рис. 11).

Родовище належить до вулканогенно-гідротермального типу, золото-кварц-сульфідної формації. Рудні тіла не виходять на поверхню, зосереджені на глибині 60–150 м. Рудні мінерали: сфалерит, галеніт, пірит, халькопірит, піротин, золото, електрум; трапляються прустит, полібазит, аргентит, самородне срібло; жильні – кварц, адуляр, рідше халцедон, каолінит, гідрослюди. З

глибиною кількість сульфідів зростає. Золото вільне, від тонкого до великого, пробність 500–900 (переважає 720–760), його вміст 4,5–15 г/т, відношення Au/Ag 1:3.

Середній вміст свинцю 1,62 %, цинку – 2,01 %. Запаси свинцю за категоріями C_1+C_2 становлять 295 тис. т, цинку – 621,6 тис. т; прогнозні ресурси за категорією P_2 : свинцю – 480 тис. т, цинку 960 тис. т (Гурський, 2008). Родовище розробляє ЗАТ "Поліметали України", але особливості розподілу золота у розрізі родовища, а саме зменшення його вмісту з глибиною, зміна форми знаходження й інших характеристик можуть вже в недалекому майбутньому спричинити проблеми приросту запасів цього металу і технології його вилучення.

Загалом запаси свинцю Берегівського рудного району дорівнюють 404,4 тис. т, прогнозні ресурси – понад 1670 тис. т; запаси цинку – 971,0 тис. т, ресурси – більше 2,5 млн т (Гурський, 2008).

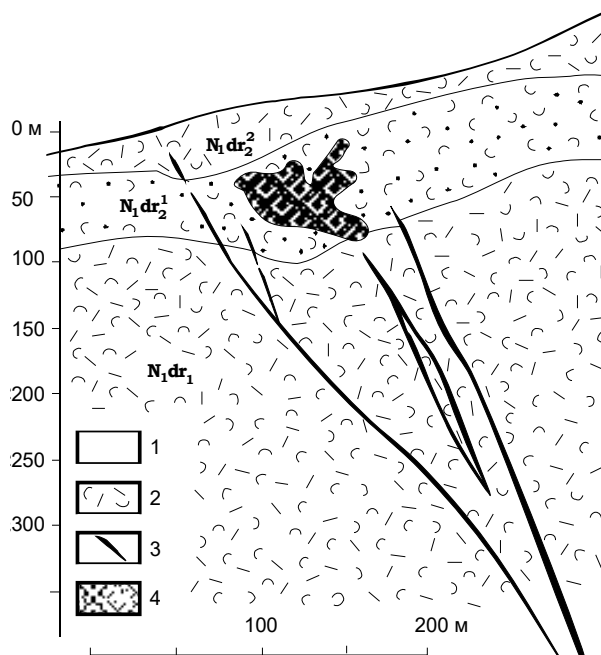


Рис. 11. Схема будови Мужіївського родовища (Михайлов, Федчук, 2008):
1 – туфобрекчія; 2 – туфи ріолітів; 3 – жильні сульфідні тіла; 4 – золоторудний штокверк

Фактори контролю зруденіння Берегівського рудного району. Рудне навантаження Берегівського рудного району зумовлене сприятливим поєднанням багаторівневої системи металогенічних факторів контролю зруденіння: структурних, літолого-стратиграфічних, магматичних, метасоматичних, які проявлені на різних рівнях організації рудної речовини. До загальнометалогенічних факторів можна віднести положення рудного району в загальній тектонічній структурі регіону, геодинамічні, палеотектонічні та палеовулканологічні обстановки формування металогенічних магматичних асоціацій, вулканічних та деформаційних тектонічних структур.

Берегівський рудний район розташований на окраїні Паннонського серединного масиву, на його межі зі Складчастими Карпатами, від яких він відділений глибинним Транскарпатським розломом. Його активізація в неогені призвела до формування двох великих вулканічних структур: Берегівського нагір'я, складеного переважно кислими вулканітами і Вигорлат-Гутинського пасма, складеного переважно середніми і основними вулканітами.

Структурні фактори контролю зруденіння проявлені на всіх рівнях організації рудно-магматичного процесу. Найважливішими з них є рудоконтролювальні розломи вищого, I, II рангу та рудовмісні розломи III рангу. До розломів вищого рангу належить Транскарпатський глибинний розлом, який розділяє Складчасті Карпати і Паннонський масив. Розломи I рангу контролюють розміщення вулканоструктур Берегівського нагір'я і Вигорлат-Гутинського пасма. До рудоконтролювальних розломів II рангу належать розривні порушення, у зонах впливу яких розташовані рудні поля родовищ. Серед них особливо сприятливими є зони перетину різноспрямованих розломів. Рудовмісні розломи III рангу безпосередньо контролюють розташування рудних тіл.

Літолого-стратиграфічні і магматичні фактори проявлені в приуроченості зруденіння до вулcano-структур Берегівського нагір'я, складених неогеновими вулканітами кислого складу.

Роль метасоматичних факторів проявляється в приуроченості ендегенного зруденіння до полів метасоматично змінених порід, серед яких переважає формація

низькотемпературних вторинних кварцитів і аргілізитів зональної будови, що зумовлює зональне розташування рудних формацій із приуроченістю золотого зруденіння до верхніх зон кварц-алуніт-гідрослюдистих метасоматитів, а поліметалічного – до нижніх зон альбіт-кварцових і адуляр-кварцових метасоматитів.

Висновки

Порівняльна характеристика двох важливих рудних районів із поліметалічною мінералізацією – Успенського в Центральному Казахстані і Берегівського в Закарпатті – показує, що, незважаючи на істотні відмінності в геологічній будові, віці, складі рудних тіл, існують загальні закономірності формування, подібні фактори та критерії свинцево-цинкової мінералізації. Водночас головними факторами поліметалічної мінералізації служать структурні, літолого-стратиграфічні, магматичні та метасоматичні, проявлені на різних рівнях організації рудної речовини. Проведені дослідження дозволяють рекомендувати отримані висновки щодо факторів та критеріїв поліметалічного зруденіння як науково-методичні засади прогнозу та пошуків свинцево-цинкових родовищ в інших регіонах світу.

Отримані нові дані про атасуїський тип родовищ Казахстану дають змогу успішно вирішувати багато питань генезису подібних поліметалічних родовищ, показують їхній взаємозв'язок і закономірності формування у зв'язку із субмаринною вулканічною діяльністю. Ці дані за своїм значенням безсумнівно далеко виходять за межі Успенського поясу і Центрального Казахстану і зближуються з іншими матеріалами поліметалічних родовищ світу.

В Україні невеликі родовища і прояви свинцю і цинку, пов'язані з неогеновими вулканітами Закарпаття, за своїм масштабом не відповідають родовищам Центрального Казахстану, що, вочевидь, пов'язане з різною геологічною будовою цих регіонів, насамперед обмеженням поширенням в Україні акреційних і острівнодужних комплексів масштабних рухливих поясів і постакреційних асоціацій вулcano-плутонічних поясів. Тому очікувати на відкриття великих родовищ поліметалів в Україні не варто, хоча залучення відомих об'єктів до промислового відпрацювання, безумовно, є важливим завданням геологорозвідувальної галузі України.

Список використаних джерел

- Байбатша, А.Б. (2008). Геология месторождений полезных ископаемых. КазНТУ.
- Гурський, Д.С., Єсипчук, К.Ю., Калінін, В.І. та ін. (2006). Металічні і неметалічні корисні копалини України. Т. 1. Металічні корисні копалини. Центр Європи.
- Гурський, Д.С. (2008). Концептуальні засади державної мінерально-сировинної політики щодо використання стратегічно важливих для економіки країни корисних копалин. ЗУКЦ.
- Зацеха, Б.В., Кваснича, В.Н., Галій, С.А., Матковский, О.І. (1984). Типоморфизм минералов полиметаллических и ртутных месторождений Закарпатья. Наукова думка.
- Лазаренко, Е., Гнилко, М., Зайцева, В. (1968). Металлогения Закарпатья. Львов. ун-т.
- Мазуров, А.К. (2005). Металлогеническое районирование Казахстана. *Известия Томского политехнического университета*, 308, 4, 33–39.
- Металлогения Казахстана. Металлогенические комплексы и закономерности их проявления. (1983). Наука.
- Митчелл, А., Гарсон, М. (1984). Глобальная тектоническая позиция минеральных месторождений. Мир.
- Михайлов, В.А., Шевченко, В.І., Огар, В.В. та ін. (2007). Металічні корисні копалини України. ВПЦ "Київський університет".
- Михайлов, В.А., Федчук, В.Я. (2008). Металогения золота. ВПЦ "Київський університет".
- Мінеральні ресурси України. Щорічник (2020). ДВНП "Геоінформ України". http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf
- Парилов, Ю.С. (2012). Генезис основных типов месторождений цветных металлов Казахстана (по результатам изучения флюидных включений).
- Рузаев, Р.В. (2005). Металлогения континентальных палеорифтов Центрального Казахстана. <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2005/K01/028.pdf>
- Сасюк, В.Т. (2001). Біганське алуніт-барит-золотополіметалічне родовище. *Наук. праці Інст. фундамент. дослідж. Знання України*, 136–140.
- Третьяков, Ю.І., Сальников, В.Д. (1998). Свинец и цинк (Геолого-экономический обзор). Геоинформ.
- Ужкенов, Б.С., Мазуров, А.Х., Селифонов, Е.М. и др. (2004). Ресурсный потенциал цветных металлов Казахстана как фактор устойчивого развития минерально-сырьевого сектора экономики. *Геонауки в Казахстане. КазГео*, 23–33.
- Щерба, Г.Н., Паталаха, Е.І. и др. (1968). Геология и металлогения Успенской тектонической зоны (Центральный Казахстан). Т. 6. Металлогения. Наука.
- Щербань, І.П., Копилова, Л.В., Матковский, О.І. и др. (1988). Околорудные метасоматиты Закарпатья. Наукова думка.
- Mineral Commodity Summaries. (2020). USGS, 200 p. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- 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, London, Special Publications. *Journal article* 2022-03-28. <https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133>
- Seltmann, R., Porter, T.M. (2005). PGS Publishing, Linden Park. <https://www.geokniga.org/books/5051>
- References**
- Baibatsha, A.B. (2008). *Geology of mineral deposits*. KazNTU [In Russian].
- 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 Russian].
- Gurskiy, D.S., Esipchuk, K.Yu., Kalinin, V. I., et al. (2006a). *Metallic and Non-Metallic Minerals of Ukraine. Vol. I. Metallic Minerals*. Center of Europe [In Russian].
- Lasarenko, E., Gnisko, M., Zaytseva, V. (1968). *Transcarpathian metallogeny*. Lviv University [In Russian].
- Mazurov, A.K. (2005). Metallogenic zoning of Kazakhstan. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 308, 4, 33–39 [In Russian].
- Metallogeny of Kazakhstan. Metallogenic complexes and patterns of their manifestation. (1983). Science [In Russian].
- Mineral Commodity Summaries, (2020). USGS, 200p. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- Mineral Resources of Ukraine. (2020). Kyiv: SRDE "Geoinform of Ukraine". http://geoinf.kiev.ua/M_R_2020.pdf (accessed 15.12.22).
- Mitchell, A., Garson, M. (1984). Global tectonic position of mineral deposits. Mir [In Russian].
- Mykhailov, V.A., Fedchuk, V.Ya. (2008). *Metallogeny of Gold*. Kyiv University Publishing [In Russian].
- 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, London, Special Publications. *Journal article* 2022-03-28. <https://doi.org/10.1144/SP526-2021-133>
- Mykhailov, V.A., Shevchenko, V.I., Ogar, V.V. et al. (2007). *Metallic Minerals of Ukraine*. Textbook. Kyiv University [In Russian].
- Parilov, Yu.S. (2012). Genesis of the main types of non-ferrous metal deposits in Kazakhstan (according to the results of the study of fluid inclusions) [In Russian].
- Ruzaev, R.V. (2005). Metallogeny of continental paleorifts of Central Kazakhstan. <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Conferences/2005/K01/028.pdf> [In Russian].
- Sasuk, V.T. (2001). Biganske alunite-barite-gold-polymetallic deposit. Sc. Work of the Inst. of Fund. Invest. Znanina of Ukraine, 136–140 [In Russian].
- Scherban, I.P., Kopylova, L.V., Matkovsky, O.I. et al. (1988). Transcarpathian metasomatic wall-rock. *Nauk. dumka* [In Russian].
- Seltmann, R., Porter T.M. (2005). PGS Publishing, Linden Park. <https://www.geokniga.org/books/5051>
- Shcherba, G.N., Patalakha, E.I. et al. (1968). *Geology and metallogeny of the Uspensky tectonic zone (Central Kazakhstan)*. Vol. 6. Metallogeny. Science [In Russian].
- Tretyakov, Y.I., Salnikov, V.D. (1998). Lead and Zink (Geological-economic review). *Geoinform* [In Russian].
- Uzhkenov, B.S., Mazurov, A.X., Selifonov, E.M. et al. (2004). The resource potential of non-ferrous metals in Kazakhstan as a factor in the sustainable development of the mineral resource sector of the economy. *Geosciences in Kazakhstan: Reports of Kazakh geologists*. KazGeo, 23–33 [In Russian].
- Zacykha, B.V., Kvasnytsa, V.N., Galiy, S.A., Matkovsky, O.I. (1984). Minerals typomorphism of Transcarpathian polymetallic and mercury deposits. *Naukova dumka* [In Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 25.01.23
Прорецензовано / Revised: 16.05.23
Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Volodymyr MYKHAILOV, DSc (Geol.), Prof.

ORCID ID: 0000-0002-1837-9739

e-mail: vladvam@gmail.com,

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Ainel YESSENDOSSOVA, PhD Student

e-mail: ainelesendosova@mail.ru

NJSC "Abylka Saginov Karaganda Technical University", Karaganda, Republic of Kazakhstan

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THE GEOLOGICAL STRUCTURE AND LEAD-ZINC MINERALIZATION OF THE USPENSKY (CENTRAL KAZAKHSTAN) AND BEREZIVSKY (TRANSCARPATHIAN) ORE REGIONS

The purpose of the article is to conduct a comparative description of the Uspensky in Central Kazakhstan and Berezhivsky in Transcarpathian ore regions in order to clarify the factors and criteria for lead-zinc mineralization, patterns of location, formation and localization of polymetallic deposits. The study used general geological methods of research, in particular, methods of geological survey, prospecting and exploration of deposits, a comparative analysis of areas with different geological structures, etc. As a result, it was found that the main factors of polymetallic mineralization are structural, lithological-stratigraphic, magmatic and metasomatic, manifested at different levels of organization of ore matter, at different times, in different geological and structural conditions. The scientific novelty lies in the fact that the conducted studies allow us to recommend the findings regarding the factors and criteria of polymetallic mineralization as scientific and methodological foundations for forecasting and prospecting for lead-zinc deposits in other regions of the world, including Ukraine. The practical significance lies in the fact that the new data obtained on the Atasu type of deposits in Kazakhstan allow us to successfully solve many issues of the genesis of such polymetallic deposits, show their relationship and patterns of formation in connection with submarine volcanic activity. These data, in their significance, undoubtedly go far beyond the limits of the Uspensky belt and Central Kazakhstan and are close to other materials of polymetallic deposits of the world.

Key words: polymetallic mineralization, ore region, factors and criteria of mineralization.

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 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.08>Станіслав ЛИТВИНЮК¹, канд. геол. наук
e-mail: lytvyniuksf@gmail.comМарія КУРИЛО², д-р геол. наук, доц.
e-mail: kurilo@univ.kiev.uaІван ВІРШИЛО^{2,3}, канд. геол. наук, доц.
e-mail: ivirshylo@gmail.comМихайло БРАТАХ³, канд. техн. наук
e-mail: mykhailo.bratakh@ugv.com.ua¹Державна комісія України по запасах корисних копалин, Київ, Україна²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна³УкрНДІгаз, АТ "Укргазвидобування", Київ, Україна

БАЗОВІ ОЗНАКИ КЛАСИФІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЯК ІНСТРУМЕНТ УПРАВЛІННЯ ТА ІНВЕСТИЦІЙНОГО АНАЛІЗУ ПРОЄКТІВ НАДРОКОРИСТУВАННЯ

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

Поява класифікаційних систем запасів і ресурсів мінеральної сировини датується початком ХХ століття, що синхронізується з розвитком гірничої справи Великої Британії, Німеччини та США. Розробка та вдосконалення сучасних класифікацій мінеральної сировини та енергетичних ресурсів, їхньої термінології, визначень і понять мають історію розвитку вже понад 40 років. Відокремлений розвиток найуживаніших класифікацій привів до появи різних дефініцій та визначень характеристики однакових або схожих категорій запасів і ресурсів корисних копалин за геологічними та техніко-економічними ознаками. Запропоновано методичні підходи "оперативної гармонізації" (універсальний класифікатор) як інструментарій для управління ресурсами та інвестиційного аналізу родовищ (ділянок надр) твердих (металічних та неметалічних) корисних копалин.

Проведено аналіз і класифікацію ресурсів комплексного проєкту користування надрами, у межах якого передбачено використання геотермальних ресурсів, запасів солі та супутнього вилучення корисних компонентів із супутніх пластів вод, які відмінні за ступенем вивчення і реалізації. Для проєкту "Солотвино" фіксується повне врахування всіх класифікаційних ознак як окремих складових ресурсів, так і проєкту загалом лише під час застосування класифікації UNFC.

Ключові слова: класифікація, запаси, управління ресурсами, категорії, ознаки класифікацій.

Актуальність дослідження. Актуальність даного дослідження пов'язана з інтеграцією вітчизняної геологічної галузі та видобування в міжнародні та регіональні галузеві організації, що включає геологічний, технологічний, економічний та екологічний аспекти інвестування. Вітчизняна мінерально-сировинна база містить багато пунктів із переліку критичних видів корисних копалин для США, Канади, Японії, Австралії та ЄС. Використання міжнародних стандартів та класифікацій під час підготовки геологічної інформації, яка стосується наших об'єктів, прискорить прийняття рішень щодо їх інвестування та реалізацію проєктів надрокористування. Розуміння вимог міжнародних стандартів до розвідки родовищ дасть змогу нам швидко та якісно вивчати власні об'єкти та відбирати цікаві іноземні проєкти.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Мінерально-сировинна база України налічує тисячі опитуваних і розвіданих ділянок надр, частина з яких вже залучена у промислове освоєння, а частина потребує пошуку інвестицій для подальшого освоєння. Інвестування об'єктів надрокористування сьогодні є сферою міжнародного бізнесу й потребує використання вимог та ознак міжнародних стандартів і класифікаційних систем, що значно полегшує підготовку і розуміння геологічної інформації. Міжнародні стандарти геологічного вивчення, оцінки запасів і ресурсів, а також вітчизняні нормативні документи містять класифікації об'єктів за базовими ознаками, які відображають регіональні традиції розвитку геологічної та добувної галузі. У більшості випадків класифікації містять ознаки геологічного вивчення і підготовленості ділянок надр до промислового освоєння, рівень економічної ефективності проєкту, а також інші ознаки, які можуть бути комплексними і включати багато факторів промислової цінності родовищ або ділянок надр.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спираються автори, виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.

Оскільки Рамкова класифікація створена для гармонізації всіх можливих національних систем (UNFC, 2019), то в останнє десятиліття з'явилися додаткові інструменти "перекладу", які відображені у так званих Bridging Documents (Bridging Document, 2013, 2015). Більшість публікацій описують регіональні особливості використання стандартів оцінки (Баряцька, Сафронова, 2020; Рудько, 2017; Рудько та ін., 2018; Camisani-Calzolari, 2002; Wagner et al., 2019; Minventory..., 2023).

Формулювання цілей статті. У роботі проводиться аналіз і зіставлення класифікаційних ознак різних систем – Рамкова класифікація ООН / UNFC United Nations Framework Classification for Resources (UNFC, 2019), Міжнародні стандарти звітності Комітету мінеральних ресурсів / The Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards CRIRSCO (CRIRSCO, 2019) – з метою встановлення ознак, які дозволяють проводити оперативне управління мінеральними ресурсами. У роботі запропоновано методичні підходи "оперативної гармонізації" (універсальний класифікатор) як інструментарій для управління ресурсами та інвестиційного аналізу родовищ (ділянок надр) твердих (металічних та неметалічних) корисних копалин.

Виклад основного матеріалу дослідження. У світі, в різних юрисдикціях, діє значна кількість (понад 100) класифікацій запасів і ресурсів корисних копалин, які використовують власні терміни і визначення, що гальмує інформаційний обмін та істотно ускладнює діяльність міжнародних гірничодобувних та фінансових компаній. Крім того, використання різних класифікаційних систем не сприяє сталому розвитку та управлінню ресурсами на глобальному та регіональному рівнях.

Проаналізувавши світовий гірничодобувний сектор мінеральних ресурсів (Reichl, Schatz, 2022), об'єктивно виділяється декілька груп класифікаційних систем, що містять ідентичний або схожий перелік ознак категоризації, термінів, визначень та понять.

Серед класифікацій запасів і ресурсів твердих корисних копалин слід виділити:

- Система класифікації запасів і ресурсів корисних копалин Співдружності Незалежних Держав (далі – СНД) (в основі Класифікація СРСР 1981 р.);
- Система класифікації МАГАТЕ (NEA/IAEA Classification);
- Рамкова класифікація ресурсів Організації Об'єднаних Націй (UNFC);
- Шаблон Комітету з міжнародних стандартів звітності про запаси (CRIRSCO).

Враховуючи вузьку уранову спеціалізацію класифікаційної системи МАГАТЕ, автори для подальших досліджень застосували класифікаційні системи UNFC (UNFC, 2019), CRIRSCO (CRIRSCO, 2019) та Класифікацію країн СНД (Класифікація..., 1981).

Кожна із зазначених класифікаційних систем має свою історію розвитку та становлення. У 2019 р. вийшли оновлені варіанти UNFC та CRIRSCO щодо класифікаційних Систем країн СНД та Східної Європи. Слід значити, що всі вони базують на Класифікації СРСР 1981 р. та мають незначні зміни, які пов'язані з адаптацією до національного законодавства у сфері надрокористування.

UNFC. Створення UNFC ініційоване Робочою групою по вугіллю Європейської економічної комісії ООН (далі – ЕЕК ООН) з урахуванням того, що в процесі переходу країн Центральної і Східної Європи до ринкової економіки, розуміння важливості і необхідності розробки міжнародно прийнятної класифікації запасів/ресурсів набуває особливої актуальності. Оновлений варіант UNFC покликаний задовольнити потреби в різних сировинних секторах і сферах застосування, а також привести класифікацію у повну відповідність до принципів сталого управління ресурсами відповідно до Порядку денного у сфері сталого розвитку на період до 2030 р. Цей оновлений варіант не передбачає змін системи класифікації і, отже, не стосується нинішніх користувачів UNFC. Оновлений текст має спростити застосування UNFC для її користувачів.

UNFC універсальна система глобального рівня, у якій запаси класифікують на основі трьох фундаментальних критеріїв: 1) економічної і соціальної життєздатності проекту; 2) статусу й обґрунтованості проекту освоєння родовища; 3) геологічної вивченості з використанням цифрової системи кодів. Комбінації цих критеріїв створюють тривимірну систему кодів. Унаслідок подальшої регуляторної і цілеспрямованої роз'яснювальної роботи ЕЕК ООН і національних робочих груп UNFC набула подальшого поширення і визнання. Нині UNFC застосовують як основну Класифікацію (Китай, Індія, Україна, Румунія, Мексика та ін.) або мають адаптовані (гармонізовані) документи зі своїми національними класифікаціями. Нині група експертів з управління ресурсами Комітету сталої енергетики розробляє Систему управління ресурсами ООН (UNRMS) на базі основних принципів UNFC (UNFC and Social..., 2019).

CRIRSCO. Найзастосовуванішою для твердих корисних копалин є класифікаційна система шаблону CRIRSCO для публічної звітності щодо результатів геологорозвідувальних робіт, ресурсів і запасів таких корисних копалин. Основним документом, що визначає оцінку стану мінерально-сировинних активів гірничих підприємств у разі їх виходу на IPO (Initial Public Offering), котирування акцій, здобуття банківських кредитів і тощо,

є звіт про мінеральні ресурси і запаси, що перебувають у розпорядженні гірничодобувних компаній.

Шаблон подання звітності про результати геологорозвідувальних робіт, мінеральні ресурси і запаси твердих корисних копалин інтегрує мінімально необхідні стандартні вимоги, прийняті в національних стандартах звітності окремих країн світу, з рекомендаціями і роз'яснювальними керівними вказівками щодо складання публічної звітності про результати геологорозвідувальних робіт, мінеральні ресурси і запаси твердих корисних копалин. Головними принципами дії і застосування Шаблону є прозорість, матеріальність (істотність) і компетентність (transparency, materiality and competence). Публічний звіт про результати геологорозвідувальних робіт, мінеральні ресурси і запаси корисних копалин повинен бути підготовлений особисто або під керівництвом і підписаний компетентною особою. На сьогодні Комітет CRIRSCO об'єднує 14 національних Кодексів (Класифікацій), які розроблені відповідно до мінімальних стандартів CRIRSCO: JORC (Australasia), CBRR (Brazil), CIM (Canada), Comision Minera (Chile), CCRR (Colombia), PERC (Europe), NACRI (India), KCMI (Indonesia), KAZRC (Kazakhstan), MPIGM (Mongolia), OERN (Russia), SAMCODES (South Africa), UMREK (Turkey), SME (United States of America).

Класифікації СНД та деяких країн Східної Європи. Класифікацію СРСР 1981 р. взяли за основу і використовують багато країн СНД та Східної Європи. Система класифікації запасів і ресурсів корисних копалин колишнього СРСР встановлювала єдині принципи для підрахунку і державного обліку запасів корисних копалин у надрах за ступенем їхнього вивчення, а також основні принципи оцінки прогнозних ресурсів. Слід зазначити, що класифікація створювалася для вирішення передусім державних завдань в умовах планової директивної економіки. У зв'язку із цим для неї характерні такі особливості, як слабка опрацьованість економічних аспектів освоєння родовищ корисних копалин – з одного боку, а з іншого – значна увага приділялась ресурсам корисних копалин (тобто найменш вивченій частині запасів корисних копалин), як перспективам для нарощування мінерально-сировинної бази.

Викладення основного матеріалу

1. Основні цілі класифікаційних систем. Під час виділення та формування класифікаційних ознак чи їхніх груп слід звернути увагу на головну мету системи оцінки запасів і ресурсів та управління ними. Аналізуючи історію розвитку, процеси та сфери застосування (оцінка, звітність та управління), класифікаційні системи виконують свої завдання на державному (держава, співдружність держав) та "корпоративному" (промислово-фінансові групи, гірничодобувні компанії) рівні.

Державний рівень. Система оцінки передбачає державницький підхід – де основним регулятором у сфері застосування класифікаційних систем є організації державної форми правління. Головними завданнями таких регуляторів є розвиток мінерально-сировинної бази, формування і управління Державним балансом родовищ та рудопроявів корисних копалин, його достовірність, раціональне та ефективне використання надр. Такі підходи використовують країни, які мають мінерально-сировинну базу з потужним промисловим потенціалом і розвинутими геологічними інститутами різного управлінського рангу.

Характерною ознакою такого підходу є його "ревізійність", тобто комплексний облік наявних ресурсів і запасів проектів різних стадій освоєння і вивчення. Такий підхід задовольняє потреби власника надр (держава, народ) та слугує основою для системи управління ресурсами. За переліченими критеріями, такий меті у повному

обсязі відповідає UNFC та в частині підходів підрахунку і обліку – Класифікація СРСР 1981 р.

"Корпоративний" рівень. Друга система розвитку стандартів звітності запасів і ресурсів корисних копалин забезпечується діяльністю промислово-фінансових груп (компаній, інтегровані фінансові групи), чії акції котуються на міжнародних біржових майданчиках або компаніями, що планують вихід на IPO (Initial Public Offering).

З метою залучення коштів або прийняття інвестиційних рішень щодо проектів гірничодобувних активів компанії, відповідно до вимог регулятора, використовують положення того чи іншого національного (регіонального) кодексу звітності, що входять до кодексів "сімейства" Шаблону CRIRSCO і відповідають його положенням та принципам.

На відміну від попереднього підходу регулятором у сфері застосування класифікаційних систем є Біржові установи або відповідний орган, який регулює операції з акціями гірничодобувних компаній. Такий підхід передбачає оцінку активу компанії з метою прийняття надійного рішення щодо подальших інвестицій в проект (ГРП, ТЕО, експлуатація). Під час такого процесу головним пріоритетом є прогнози виробництва та визначення чистого дисконтованого грошового потоку (NPV).

2. Класифікаційні ознаки. Аналіз класифікаційних ознак різних систем, попри структурні (візуальні) відмінності, доволі логічно групується за геологічними, гірничо-технологічними та соціально-економічними критеріями.

Геологічні. До цієї групи належить сукупність природних особливостей запасів і ресурсів. Категоризація запасів і ресурсів відбувається за певним рівнем достовірності оцінювання і визначення кількісних (обсяги, глибина та морфологія залягання, рівномірність розподілу мінералізації і т. ін.) та якісних (вміст корисних і шкідливих компонентів, мінеральний склад, фізичні і хімічні властивості руди та вмісних порід тощо.) характеристик. Головним чинником визначення рівня достовірності отриманих характеристик і, відповідно, віднесення до певних груп та категорій, є мережа і детальність опробування гірничих виробок (свердловина, шурф, траншея і т. ін.).

Гірничо-технологічні. За ознаками цієї групи характеризуються гірничо-технічні умови розробки (відкритої, підземної та комбінованої) та технологічні схеми переробки та збагачення мінеральної сировини. Визначальною класифікаційною ознакою є стадія проектних вишукувань (передпроектні рішення, затверджений проект, проект розробки) та технологічних досліджень (лабораторні, напівпромислові, промислові).

Соціально-економічні. Класифікація за ознаками цієї групи охоплює визначення економічної доцільності та ефективності (потреба та ціни на мінеральну сировину, податковий режим, рентабельність, ринок збуту і т. ін.) видобутку, переробки, збагачення та реалізації товарної продукції підприємства. Окрім суто економічних особливостей, важливу роль відіграють соціальні та екологічні фактори, які пов'язані з дозвільними процедурами різних рівнів і природоохоронним законодавством.

Слід відзначити, що пряме відображення всіх трьох груп є тільки у класифікаційній системі UNFC, відповідні групи категорій – Е (економічна і соціальна життєздатність проекту), F (технічна обґрунтованість проекту), G (достовірність геологічного вивчення).

Для Шаблону CRIRSCO групи гірничо-технологічних та соціально-економічних ознак не визначають окремих категорій, а сукупно є критеріями ("модифікуючі фактори") переведення категорій ресурсів (inferred, indicated, measured), які виділені за геологічними ознаками, до категорій запасів (probable, proved).

У Класифікації СРСР за геологічними ознаками виділено категорії розвіданих (А, В, С₁), попередньо розвіданих (С₂) запасів та прогнозних і перспективних ресурсів (Р₁, Р₂, Р₃). Соціально-економічні ознаки є вирішальним під час виділення балансових і позабалансових запасів. Гірничо-технологічні ознаки враховують у процесі техніко-економічного обґрунтування параметрів кондицій на мінеральну сировину.

3. Категорії, класи та групи запасів і ресурсів. Як свідчить інформація, викладена вище, кожна класифікаційна система має певний набір ознак, критеріїв, визначень і принципів, за якими відбувається віднесення запасів та ресурсів до певних категорій і класів або визначення їх рівня достовірності.

Як зазначалось вище, UNFC – універсальна система, у якій запаси класифікують на основі трьох фундаментальних критеріїв: 1) економічної і соціальної життєздатності проекту (вісь Е); 2) статусу й обґрунтованості проекту освоєння родовища (вісь F); 3) геологічної вивченості (вісь G) з використанням цифрової системи кодів. Комбінації цих критеріїв створюють тривимірну систему кодів (рис. 1).

Перша група категорій (вісь Е1, Е2, Е3) визначає ступінь сприятливості соціальних та економічних умов для забезпечення комерційної життєздатності проекту, які включають ринкові ціни, відповідні юридичні, нормативні, природоохоронні і контрактні умови. Друга група категорій (вісь F1, F2, F3) визначає результати опрацювання технологій, досліджень і взятих зобов'язань, потрібних для реалізації проекту. Вони охоплюють ланку від початкових досліджень до опрацьованого (чинного) проекту і відображають стандартні принципи керування виробничо-збутовим ланцюгом. Третя група категорій (вісь G1, G2, G3, G4) визначає ступінь достовірності оцінки об'єму продукції, що отримують під час реалізації проекту. Комбінація категорій визначає клас проекту (стадію та перспективність).

З метою більшої прозорості за глобального обміну інформацією в UNFC визначено додаткові типові підкласи, що засновані на повній деталізації за додатковими підкатегоріями (табл. 1).

Під час характеристики класів та категорій UNFC слід зазначити, що в даній роботі аналізується варіант 2019 р. (серія публікацій № 61, ECE/ENERGY/125). Зазначений варіант є оновленням варіанту 2009 р. (серія публікацій № 42, ECE/ENERGY/94), що був розроблений для викопних енергетичних і мінеральних запасів та ресурсів. У зв'язку з розширенням сфери застосування (відновлювальні та антропогенні джерела ресурсів) і універсальністю класифікації, UNFC-2019 р. змінює назву на "Рамкова класифікація ресурсів Організації Об'єднаних Націй". Поточний оновлений варіант не змінює системи класифікації і відповідно не стосується користувачів UNFC-2009.

Основу системи Шаблону CRIRSCO для класифікації оцінок кількості та якості корисної копалини в надрах з метою встановлення різних рівнів геологічної достовірності і різного ступеня (глибини) техніко-економічної оцінки ілюструє рис. 2.

У кожному конкретному випадку віднесення запасів/ресурсів до тих або інших категорій виконують Компетентні особи (компетентні експерти). Згідно з установленними вимогами, *Компетентна особа несе відповідальність за всю необхідну документацію, пов'язану з підготовкою публічних звітів, що випускаються за стандартами звітності країн сімейства CRIRSCO.*

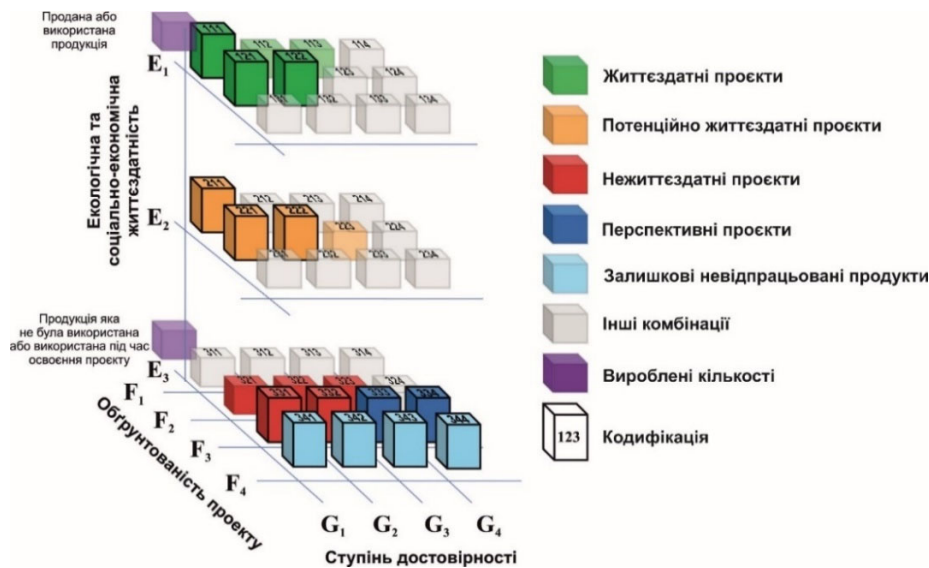


Рис. 1. Категорії UNFC і приклади класів

Таблиця 1

Класи UNFC, що визначені категоріями і підкатегоріями							
Сумарна продукція	Видобута / вироблена	Продана або використана продукція					
		Продукція, яка не використовується або використана під час робіт (видобутку)					
	Клас		Підклас	Категорії			
				E	F	G	
	Відомі джерела (родовища)	Життєздатні проекти	Чинні	1	1.1	1, 2, 3	
			Затверджені до розробки	1	1.2	1, 2, 3	
			Обґрунтовані для розробки	1	1.3	1, 2, 3	
		Потенційно життєздатні проекти	В очікуванні розробки	2	2.1	1, 2, 3	
			Розробка затримана	2	2.2	1, 2, 3	
			Розробка не з'ясована	3.2	2.2	1, 2, 3	
Нежиттєздатні проекти		Розробка нежиттєздатна	3.3	2.3	1, 2, 3		
		Залишкові продукти, що не розробляються в рамках виявлених проектів		3.3	4	1, 2, 3	
Потенційні джерела (родовища)	Перспективні проекти (геологорозвідувальні проекти)		[Підкласи не визначені]		3.2	3	4
	Залишкові продукти, що не розробляються в рамках перспективних проектів			3.3	4	4	

*Проекти, що очікують на розробку, можуть відповідати вимогам категорії E1.

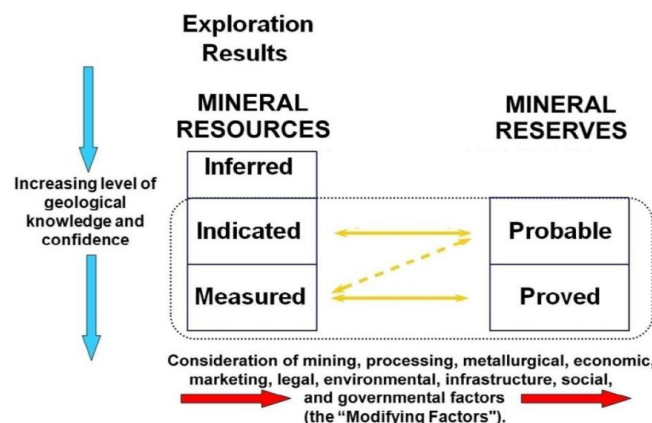


Рис. 2. Загальне співвідношення між результатами геологорозвідувальних робіт, мінеральними ресурсами і запасами корисних копалин

Відповідно до кодексів звітності сімейства CRIRSCO ресурси слід класифікувати в порядку зростання ступеня геологічної вивченості й достовірності за трьома категоріями:

- 1) можливі (передбачувані) (*inferred*) ресурси;
- 2) обчислені (*indicated*) ресурси;
- 3) виміряні (*measured*) ресурси.

Запаси розподіляють за двома категоріями в порядку зростання детальності їх оцінки – геологічного вивчення і ступеня детальності обліку модифікуючих чинників

(гірничотехнічні, технологічні, економічні, кон'юнктурні, правові, екологічні, соціальні та адміністративні особливості):

- 1) ймовірні (*probable*) запаси;
- 2) доведені (*proved*) запаси.

Відповідно до Шаблону CRIRSCO обґрунтування "запасів" потребує врахування *модифікуючих факторів* – інтегральних термінів, що охоплюють гірничотехнічні, технологічні, економічні, кон'юнктурні, правові, екологічні, соціальні, адміністративно-управлінські аспекти аналізу та оцінки.

Основні терміни та визначення Класифікації СРСР 1981 р., як зазначалось вище, широко використовують країни колишнього Радянського Союзу. Для висвітлення та кращого розуміння специфіки ознак, на яких побудована класифікація, буде використано класифікаційну систему Російської Федерації, яка на державному рівні провела гармонізацію з CRIRSCO та UNFC.

Класифікація і методичні рекомендації щодо її застосування – це досить повний системний опис усіх основних методичних принципів ведення геологорозвідувальних робіт, оцінки запасів/ресурсів і їх категоризації за ступенем геологічної вивченості, економічної значущості й підготовленості до промислового освоєння. Класифікація визначає єдині принципи державного обліку запасів, кількості і якості яких, економічна значущість, гірничотехнічні, технологічні, гідрогеологічні, екологічні та інші умови видобутку підтверджені державною експертизою.

Згідно з цією Класифікацією визначають запаси категорій А, В, С₁ і С₂ – за ступенем розвіданості, і прогнозні ресурси категорій Р₁, Р₂ (Р₃) – за ступенем обґрунтованості, а також групи родовищ (ділянок) за ступенем складності геологічної будови, що безпосередньо впливає на виділення категорій запасів. За промисловим значенням виділяють балансові та позабалансові запаси.

Запаси за економічним значенням вирізняються за двома категоріями/групами – "балансові" (економічно ефективні для відпрацювання) і "позабалансові" (маржинальні або потенційно економічні). Водночас запаси обох груп розвіданості перекласифіковують у балансові запаси або позабалансові, лише за результатами державної експертизи, після чого вони підлягають обліку в Державному балансі.

4. Зіставлення (гармонізація). Охарактеризовані класифікаційні системи мають свої відмінності, що зумовлено історією розвитку класифікацій, метою, юрисдикцією поширення та застосуванням. Незважаючи на відмінності, аналіз стадійності геологорозвідувальних робіт, технологічного та оціночного процесу дає змогу виділити спільні ознаки та критерії для коректного порівняння та гармонізації.

Роботи з гармонізації та зіставлення різних класифікаційних систем здійснюються на міжнародному та експертному рівнях. Показовими дослідженнями є створені в рамках діяльності Групи експертів з управління ресурсами Комітету сталої енергетики ЄЕК ООН узгоджувальні документи зіставлення і гармонізації провідних класифікаційних систем (Bridging Document). Із врахуванням цих робіт, а також власних досліджень автори виконали зіставлення основних категорій, класів та груп різних класифікаційних систем за відповідними ознаками (табл. 2–4).

Таблиця 2

Загальна схема зіставлення класифікаційних систем										
Рівень достовірності	UNFC					CRIRSCO		Класифікація СРСР		
	Клас	Підклас	Категорії			Запаси	Ресурси	Балансові запаси	Позабалансові запаси	Ресурси
			Е	Ф	Г					
 найвищий найнижчий	Життєздатні проекти	Чинні	1	1	1	proved		A, B, C ₁		
		Затверджені до розробки	1	1	2	probable		A, B, C ₁ (іноді C ₂)		
	Потенційно життєздатні проекти	В очікуванні розробки	2 (3)	2 (3)	1		measured		A, B, C ₁	
			2 (3)	2 (3)	2		indicated		C ₂ (іноді C ₁)	
			2 (3)	2 (3)	3		inferred			P ₁
	Нежиттєздатні проекти	Розробка не з'ясована	3	3	3, 4					P ₂ (P ₃)

Слід відзначити доволі надійне зіставлення за геологічними ознаками всіх класифікаційних систем, що пов'язано з схожими стадіями вивчення та методикою геологорозвідувального процесу. Щодо інших класифікаційних ознак, то їхнє зіставлення потребує обережності та додаткової деталізації, особливо груп категорій Класифікації СРСР.

Труднощі зіставлення пов'язані з багатьма факторами, серед яких не тільки різниця в дефініціях, але й у вимогах (критеріях) віднесення до тієї чи іншої категорії (групи категорій). Для прикладу критерії визначення запасів і ресурсів різняться для всіх класифікаційних систем. Для Шаблону CRIRSCO вирішальним є врахування модифікуючих факторів, тоді як для Класифікації СРСР – ступінь геологічного вивчення (розвіданість). В останній версії UNFC визначення поняття запасів і ресурсів використовують у загальному сенсі (ресурс як кількість продукту). Крім того, ще одна обставина, на яку слід звернути увагу, це те, що "ревізійність" класифікаційних систем UNFC та СРСР дає змогу виділяти додаткові категорії для результатів геологорозвідувальних робіт. У випадку Шаблону CRIRSCO визначено неприпустимість

визначення кількості та якості (вмісту) за результатами геологорозвідувальних робіт (рис. 3).

Для зіставлення класифікаційних ознак розглянутих систем найілюстративнішим є аналіз комплексних об'єктів користування надрами, у межах яких один проєкт включає кілька ресурсів, які відмінні за ступенем вивчення і реалізації.

Прикладом такого комплексного проєкту є пілотний геотермальний проєкт "Солотвино" (рис. 4), який включає такі складові:

- газове родовище з великим вмістом супутніх газів (10–25 % CO₂), але низькою продуктивністю (0,3 тис.м³/д);
- підвищений тепловий потік (80 МВт/м²);
- наявність солоних пластових вод + флюїдоупор солевих куполів;
- прикордонна область з ЄС;
- наявність пробурених свердловин, що можуть бути залучені в іншу технологічну схему;
- можливість комбінування з проєктом метанування CO₂.

Корисна копалина	РКООН	Класифікації СРСР 1960, 1981 рр.	Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO)
Газ природний	✓	✓	✗
Нафта	✓	✓	✗
Металічні (рудні)	✓	✓	✓
Води (мінеральні, питні, технічні)	✓	✓	✗
Вугілля	✓	✓	✓
Торф	✓	✓	✓ ✗
Неметалічні (будівельна, гірничохімічні, гірничотехнічні)	✓	✓	✓ ✗
Каміння коштовне та колекційне	✓	✓	✗
Геотермальна енергія	✓	✗	✗
Енергія сонця, вітру, біомаси, річкового потоку, відливів та припливів	✓	✗	✗
Антропогенні ресурси	✓	✗	✗

Рис. 3. Оцінка корисних копалин за різними класифікаційними системами

Особливістю проекту є відмінність основного виду корисної копалини і базового виду користування надрами, а також їх різний ступінь вивченості і освоєння. Основним видом користування надрами тут прийнято освоєння геотермальних ресурсів Солотвинського родовища, водночас на сьогодні виконується лише оцінка його як потенційного пілотного проекту для вилучення теплової енергії пластових вод. Вторинною метою реалізації проекту є оцінка порового простору родовища

(окремих горизонтів) як потенційного сховища діоксиду вуглецю, що вилучається як супутній газ або постачається із зовнішніх джерел. Супутніми видами користування надрами є видобування солі та вилучення корисних компонентів, які містяться в супутніх пластових водах. Зведена інформація про ресурси і види користування надрами, а також ступінь їх вивчення і освоєння наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Зведена інформація про ресурси і види користування надрами проекту "Солотвино"

№	Ресурси, що залучаються при реалізації проекту	Види користування надрами	Ступінь вивченості	Запаси і ресурси	Наявність основних засобів для освоєння ресурсу
1	Ресурси теплової енергії пластових вод – <i>основний вид користування надрами</i>	Геологічне вивчення, у тому числі дослідно-промислова розробка	Початкова оцінка проекту / Scoping Study	Прогнозні і перспективні ресурси	Наявні свердловини видобутку газу, які частково можуть залучатися в освоєння
2	Поровий простір формацій як потенційне сховище діоксиду вуглецю	Геологічне вивчення, у тому числі дослідно-промислова розробка. Будівництво та експлуатація підземних споруд, не пов'язаних з видобуванням корисних копалин	Початкова оцінка проекту / Scoping Study	Прогнозні і перспективні ресурси	Відсутні
3	Кам'яна сіль	Видобування	Передпроектні рішення	Розвідані і попередньо розвідані запаси	Наявні законсервовані виробки, які частково можуть залучатися
4	Вилучення корисних компонентів, які містяться в супутніх пластових водах	Геологічне вивчення, у тому числі дослідно-промислова розробка	Початкова оцінка проекту / Scoping Study	Перспективні ресурси	Відсутні (крім вищенаведених)

Для даного об'єкта (ділянки надр) всі перелічені ресурси доцільно розглядати в рамках освоєння одного проекту, що дозволяє підвищити ступінь успішності його реалізації.

За рівнем економічної і соціальної життєздатності високі значення мають ресурси теплової енергії пластових вод, які розглядаються як основна корисна копалина, а також критичні корисні компоненти, які містяться в супутніх пластових водах. Ці обидва ресурси відзначаються високою ліквідністю на момент

оцінки проекту. Ресурси і запаси кам'яної солі мають найвищий ступінь економічної і соціальної життєздатності, що пояснюється наявністю законсервованих об'єктів солевидобутку на даній території і обмеженому доступі до видобувних потужностей на Артемівському родовищі, яке було єдиним об'єктом солевидобутку протягом останнього десятиріччя в Україні.

За гірничо-технологічними ознаками більшість складових проекту класифікуються як клас початкової оцінки або часткових передпроектних рішень, що відповідає

класам F2 та F3 за UNFC. Загальний проєкт характеризується технічною можливістю розробки, яка підлягає подальшій оцінці, хоча частина ресурсів (потенційне

сховище CO₂) може бути класифікована як така, де "технічну здійсненність проєкту розробки неможливо оцінити через обмеженість даних".

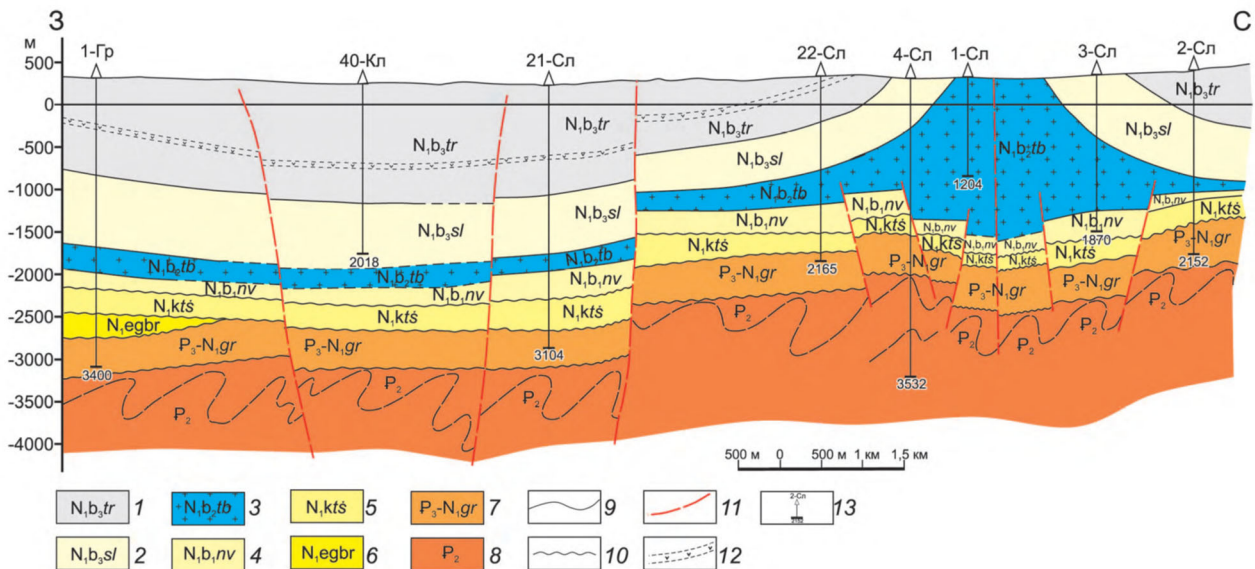


Рис. 4. Солотвинська площа. Геологічний розріз.

1–7 – світи: 1 – тересвинська, 2 – солотвинська, 3 – тереблянська, 4 – новоселицька, 5 – терешульська, 6 – буркалівська, 7 – грушівська; 8 – еоценові відклади; 9 – згідні геологічні межі; 10 – незгідні геологічні межі; 11 – розривні порушення; 12 – нанківський туф; 13 – номер свердловини та її фактичні глибини, м (Лозиняк, 2009)

Таблиця 4

Класифікація ресурсів проєкту "Солотвино" за основними класифікаційними системами

Вид ресурсів	UNFC					CRIRSCO		Класифікація CPCP		
	Клас	Підклас	Категорії			Запаси	Ресурси	Балансові запаси	Поза-балансові запаси	Ресурси
			E	F	G					
Ресурси теплової енергії пластових вод	Potentially Commercial Project / Потенційно життєздатні проекти	В очікуванні розробки	2 3	2 3	2 3	–	Exploration Results	–	–	P ₁ P ₂
Потенційне сховище CO ₂	Exploration Project / Нежиттєздатні проекти	Розробка не з'ясована	3	3	4	–	Exploration Results	–	–	P ₂
Кам'яна сіль	Commercial Project / Життєздатні проекти	Затверджені до розробки	1	2	1 2	proved probable	Measured Indicated	A, B, C ₁	A, B, C ₁	
Вилучення корисних компонентів, які містяться у супутніх пластових водах	Potentially Commercial Project / Потенційно життєздатні проекти	В очікуванні розробки	2 (3)	2 (3)	2	–	Inferred		C ₂	P ₁
Загальний проект комплексного використання надр	Potentially Commercial Project / Потенційно життєздатні проекти	В очікуванні розробки	2	3	2 3					

За ознакою *геологічного вивчення* найбільший ступінь мають запаси кам'яної солі, які розглядаються в даному проєкті як супутня корисна копалина, яка буде видобуватися під час проходки виробок і свердловин для вилучення геотермальних ресурсів. Самі ресурси теплової енергії пластових вод класифікуються як перспективні, оскільки базові параметри їхньої оцінки визначено за результатами розвідувальних робіт у процесі освоєння вуглеводнів.

Для наведеного прикладу фіксується повне врахування всіх класифікаційних ознак як окремих складових, так і проєкту комплексного використання надр загалом, під час застосування класифікації UNFC. Використання

інших класифікаційних систем дає розуміння ступеня геологічного вивчення, але недостатньо враховує наявність гірничо-технічних рішень і промислового значення проєкту загалом через відмінність у вимогах до встановлення окремих класів і категорій запасів і ресурсів.

Висновки

Інформаційна складова гірничодобувної галузі світу містить величезний об'єм аналітичних звітів, балансів і кадастрів різного рівня щодо кількісної та якісної характеристики вилучених та відновлювальних ресурсів. Складання, оформлення, класифікація такої інформації відбувається відповідно до нормативного поля країни чи регіону (адміністративного, політичного, фінансового),

де запроваджені різні методичні та юридичні підходи щодо класифікації запасів та ресурсів корисних копалин. Зазначені обставини вносять ускладнення під час формування стратегій (систем) різного рівня для управління ресурсами.

Викладений результат досліджень щодо зіставлення та гармонізації різних класифікаційних систем, покликаний запропонувати уніфіковані та стандартизовані критерії (ознаки, поняття, терміни), для методичних підходів гармонізації, як інструментарій для управління ресурсами та інвестиційного аналізу родовищ (ділянок надр) твердих (металічних та неметалічних) корисних копалин.

Виконаний аналіз значень головних категорій (класів, груп) різних класифікаційних систем дозволив виділити та охарактеризувати ознаки (критерії), що мають достатній рівень зіставлення та гармонізації.

Головні відмінності класифікаційних систем пов'язані з метою та сферою їхнього застосування, що відображене в кількості категорій та їхніх дефініціях, і вимог щодо наявності дозвільної документації різного рівня (затверджений проєкт, земля, екологія і т. ін.).

Проведений аналіз UNFC виявив, що зазначена класифікаційна система містить найповніший перелік класів, підкласів і категорій мінеральних та інших ресурсів. Це дозволяє UNFC бути узгоджувальним інструментом для зіставлення та гармонізації різних класифікаційних систем. Безумовно це потребує комплексного майбутнього підходу щодо коригування термінології та дефініцій систем, що зіставляються. Такий шлях приведе до створення універсальної класифікаційної системи, зрозумілої для всіх зацікавлених сторін (держава, інвестор, суспільство), з оптимальною деталістикою для прийняття рішень у сфері управління ресурсами на всіх рівнях.

Проаналізовано проєкт комплексного користування надрами, у межах якого передбачено використання геотермальних ресурсів, запасів солі та супутнього вилучення корисних компонентів із супутніх пластових вод, які відмінні за ступенем вивчення і реалізації. Для наведеного проєкту "Солотвино" фіксується повне врахування всіх класифікаційних ознак як окремих складових, так і проєкту комплексного користування надр загалом під час застосування класифікації UNFC.

Список використаних джерел

- Баряцька, Н.В., Сафронова, Н.Г. (2020). Застосування міжнародних класифікацій запасів і ресурсів – запорука інвестиційної привабливості українських родовищ. *Матеріали VII Міжнародного геологічного форуму "Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології та екології: наука й виробництво", 15–20 червня 2020 р., Одеса, Україна*, 15–23.
- Лозиняк, П., Місюра, Я. (2009). Перспективи газоносності відкладів Грушівської світи Закарпатського прогину. *Геологія і геохімія горючих корисних копалин*, 2(147), 31–39.
- Класифікація запасів родовищ твердих корисних копалин. (1981). Затверджена постановою Ради міністрів СРСР від 30.11.1981 № 1128.
- Rudko G., Kurylo M., Bala V. (2018). Criteria for determining industrial significance of coal reserves: domestic classification vs JORC. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(80), 63–68. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.80.08>
- Rudko, G.I. (2017). UNFC mineral reserves and resources as a tool for harmonizing world classifications. *Mineral resources of Ukraine*, (4), 7–10. <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/article/view/223>.
- Bridging Document between CRIRSCO and UNFC (2015). UNECE. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf
- Bridging Document between PRMS and UNFC (2013). UNECE. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/RPMS_UNFC2009_Bridging_ES42.pdf

Camisani-Calzolari, F.A. (2004). National and international codes for reporting mineral resources and reserves: Their relevance, future and comparison. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, June 2004, 297–305.

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

Minventory metadata portal. (2023). National reporting. Data harmonisation and standardisation, https://ec.europa.eu/assets/jrc/minventory/national-reporting26c9.html?field_cs_country_lexique_tid=

Reichl, C., Schatz, M. (2022). Minerals Production. Vienna, World Mining Data 2022. <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>

The JORC Code 2012 Edition. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves, p.44. https://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf

UNFC and Social and Environmental Management. (н.д.). <https://unece.org/unfc-and-social-and-environmental-management-0>

UNFC United Nations Framework Classification for Resources (UNFC). (2019). https://unece.org/sites/default/files/2020-12/E_ECE_ENERGY_109_WEB.pdf

Wagner, M., Bide, T., Cassard, D., Huisman, J., Leroy, P., Bavec, Š. et al. (2019). Optimising quality of information in RAW materials data collection across Europe (ORAMA). *Technical Final Report & Recommendations*. November 15, 2019, Brussels, Belgium. <http://www.orama-h2020.eu>

References

- Baryats'ka, N.V., Safronova, N.H. (2020). Zastosuvannya mizhnarodnykh klasyfikatsiy zapasiv i resursiv – zaporuka investytsiynoyi pryvabylyvosti ukraïns'kykh rodovyshch. *Aktual'ni problemy ta perspektivy rozvytku heolohiyi ta ekolohiyi: nauka y vyrobnytstvo. Materialy VII Mizhnarodnoho heolohichnoho forumu, 15–20 June 2020, Odessa, Ukraine*, 15–23 [in Ukrainian].
- Lozyniak, P., Mysyura, Ya. (2009). Prospects of gas-bearing deposits of the Hrushiv region of the Transcarpathian depression. *Geology and geochemistry of combustible minerals*, 2(147), 1–39 [in Ukrainian].
- Classification of reserves of solid mineral deposits. (1981). Approved by Resolution No. 1128 of the Council of Ministers of the USSR dated November 30, 1981.
- Bridging Document between CRIRSCO and UNFC (2015). UNECE. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/Revised_CRIRSCO_Template_UNFC_Bridging_Document.pdf
- Bridging Document between PRMS and UNFC (2013). UNECE. https://unece.org/fileadmin/DAM/energy/se/pdfs/UNFC/UNFC_specs/RPMS_UNFC2009_Bridging_ES42.pdf
- Camisani-Calzolari, F.A. (2004). National and international codes for reporting mineral resources and reserves: Their relevance, future and comparison. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, June 2004, 297–305.
- International reporting template for the public reporting of exploration targets, exploration results, mineral resources and mineral reserves. CRIRSCO. (2019). *The CRIRSCO International Reporting Template*. <https://www.crirSCO.com/template/>
- Minventory metadata portal. (2023). National reporting. Data harmonisation and standardisation, https://ec.europa.eu/assets/jrc/minventory/national-reporting26c9.html?field_cs_country_lexique_tid=
- Reichl, C., Schatz, M. (2022). Minerals Production. Vienna, World Mining Data 2022. <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf>
- Rudko, G., Kurylo M., Bala, V. (2018). Criteria for determining industrial significance of coal reserves: domestic classification vs JORC. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(80), 63–68. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.80.08>
- Rudko, G.I. (2017). UNFC mineral reserves and resources as a tool for harmonizing world classifications. *Mineral resources of Ukraine*, (4), 7–10. <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/article/view/223>
- The JORC Code 2012 Edition. (2012). Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves, p.44. https://www.jorc.org/docs/JORC_code_2012.pdf
- UNFC and Social and Environmental Management. (н.д.). <https://unece.org/unfc-and-social-and-environmental-management-0>
- UNFC United Nations Framework Classification for Resources (UNFC). (2019). https://unece.org/sites/default/files/2020-12/E_ECE_ENERGY_109_WEB.pdf
- Wagner, M., Bide, T., Cassard, D., Huisman, J., Leroy, P., Bavec, Š. et al. (2019). Optimising quality of information in RAW materials data collection across Europe (ORAMA). *Technical Final Report & Recommendations*. November 15, 2019, Brussels, Belgium. <http://www.orama-h2020.eu>

Отримано редакцією журналу / Received: 02.04.23

Прорецензовано / Revised: 13.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Stanislav LYTUVNYUK¹, PhD (Geol.)

e-mail: lytvyniuksf@gmail.com

Mariia KURYLO², Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.

e-mail: kurilo@univ.kiev.ua

Ivan VIRSHILO^{2,3}, PhD (Geol.), Assoc. Prof.

e-mail: ivirshylo@gmail.com

Mykhailo BRATAKH³, PhD (Tech.)

e-mail: mykhailo.bratakh@ugv.com.ua

¹State Commission of Ukraine on Mineral Reserves, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

³Gas Research Institute of JSC "Ukrgezvydobuvannya", Kyiv, Ukraine

BASIC CLASSIFICATION SYSTEMS FEATURES AS A TOOL FOR MANAGEMENT AND INVESTMENT ANALYSIS OF SUBSOIL USE PROJECTS

First classification systems of mineral reserves and resources appeared in the beginning of the 20th century, which coincided with the mining development in the UK, Germany and the USA. Modern classifications of mineral raw materials and energy resources, their terminology, definitions and concepts have been developed and improved for more than 40 years. Separate development of the most commonly used classifications has led to the emergence of various definitions and determinations of characteristics of the same or similar categories of mineral reserves and resources according to geological and technical-economic characteristics. The article proposes methodological approaches of "operational harmonization" (universal classifier) as a toolkit for resource management and investment analysis of deposits (subsoil areas) of solid (metallic and non-metallic) minerals.

The analysis and classification of the resources of the complex subsoil use project, which includes the use of geothermal resources, salt reserves, and the accompanying extraction of useful components from the associated reservoir waters, which differ in the degree of study and implementation, have been carried out. For this Solotvino project, full consideration of all classification features of both individual component resources and the project as a whole is recorded, only when applying the UNFC classification.

Key words: Classification, reserves, resource management, categories, classifications features.

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 553.494 (477)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.09>

Тетяна ОХОЛІНА, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: svilya@ukr.net
Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна
Галина КУЗЬМАНЕНКО, канд. геол. наук, наук. співроб.
e-mail: geology7@ukr.net
Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

ПОРІВНЯЛЬНА ГЕОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РОДОВИЩ ТИТАНУ УКРАЇНИ НА ПРИКЛАДІ НОВОМИРГОРОДСЬКОГО РОЗСИПНОГО РАЙОНУ

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

Розглянуто один із методів геолого-економічної оцінки – ранжування за бальною шкалою родовищ титанових руд на прикладі Новомиргородського розсипного району, до якого входять Бірзулівське родовище, Лікарівський, Андріївський, Валуєвський, Новомиргородський розсипи, а також Східна та Західна залишкові ділянки. Наведено короткий геологічну характеристику титанових об'єктів, що порівнювалися; охарактеризовано геологічні, якісні та економічні показники, за якими проводилася порівняльна геолого-економічна оцінка досліджуваних родовищ та розсипів. Використання бальної шкали дає змогу порівнювати об'єкти з різним ступенем вивченості і може застосовуватись для визначення перспективності будь-якого родовища серед низки об'єктів у разі обмеженої кількості інформації.

Ключові слова: титанові родовища, рейтингова оцінка, Новомиргородський розсипний район.

Постановка проблеми. Розвиток вітчизняної мінерально-сировинної бази ґрунтується на залученні інвестицій як у родовища, що розробляються, так і в об'єкти, що перебувають на стадії геологорозвідувальних робіт. Першочерговість таких об'єктів для інвестицій доцільно визначати за результатами відповідної оцінки (ранжування) за природними та промисловими критеріями, які визначають економічну цінність родовищ та проявів конкретного типу корисних копалин (Михайлов та ін., 2017).

Ранжування родовищ доцільно проводити за головними факторами, які визначають їхню промислову цінність. Передусім це кількість та якість запасів корисних копалин і решта гірничо-геологічних та техніко-технологічних чинників, які в результаті визначають економічну ефективність освоєння родовищ (Курило, Андрєєва, 2014).

Основною метою проведення порівняльної геолого-економічної оцінки є виявлення інвестиційно-привабливих для освоєння геологічних об'єктів, встановлення їх промислового значення та економічної ефективності експлуатації з урахуванням сучасних реалій.

Мета даного дослідження полягає у ранжуванні об'єктів вітчизняної мінерально-сировинної бази титану на прикладі одного із розсипних титанових районів за геологічними, гірничо-технічними та економічними критеріями для встановлення найперспективніших для освоєння об'єктів, які можна рекомендувати для подальшого геологічного вивчення (ГВ), у тому числі дослідно-промислової розробки (ДПР).

Об'єкт дослідження – мінерально-сировинна база титанових розсипів Новомиргородського району.

Предмет – геолого-економічні критерії оцінки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Рейтингова порівняльна геолого-економічна оцінка є одним із методів економічної геології, яка розвивається ще з початку минулого століття. За радянських часів вітчизняна геологія не виділяла економічний напрям досліджень в окрему науку, натомість використовувався термін "економіка мінеральної сировини".

З отриманням незалежності України економічна геологія починає стрімко розвиватися і набуває все більшого значення в розвитку науки та промисловості. Значний внесок у цьому напрямі зробили вітчизняні науковці (Коржнев та ін., 2006; Рудько та ін., 2011; Михайлов, 2023). Окрім узагальнених робіт, слід згадати праці, присвячені конкретним напрямкам. Так, роботи Г.І. Рудька

присвячені геолого-економічному аналізу та вартісній оцінці родовищ нафто-газових покладів, залізистих кварцитів, каоліну, бурштину та інших корисних копалин. У роботі (Михайлов та ін., 2011) проведено ранжування геологічних пам'яток Волино-Поділля з метою виділення найперспективніших для подальшого освоєння. Геолого-економічне переоцінювання мідних родовищ проведено на прикладі прояву Жиричі (Михайлов та ін., 2022). Порівняльну геолого-промислову оцінку за допомогою бальної шкали для родовищ графіту України висвітлено в працях (Лижаченко, 2012; Андрєєва, Лижаченко, 2014; Лижаченко, 2021), для родовищ бентоніту (Андрєєва, 2009; Андрєєва, Лижаченко, 2012). У роботі (Михайлов, Курило, 2010) проведено геолого-економічну оцінку перспективних для освоєння об'єктів флюсової сировини із врахуванням ступеня їхнього геологічного і техніко-економічного вивчення.

Отже, порівняльна геолого-економічна оцінка проводилася для багатьох видів корисних копалин, як рудної, так і нерудної сировини. Для родовищ титанових руд вперше така робота була опублікована у 2013 р. на прикладі Волинського титанового району (Свивальнева, 2013).

Матеріали і методи. В основу досліджень покладено матеріали геолого-зйомочних робіт масштабу 1:200 000, 1:50 000, дані глибинного геологічного картування та пошуково-оцінювальних робіт (Федоренко, 1970; Скоробач та ін., 1979; Скоробач та ін., 1983; Душенко, 2006) тощо.

Методику рейтингової оцінки родовищ титану раніше застосовано під час ранжування об'єктів Волинського титанового району і описано в ряді публікацій (Свивальнева, 2012, 2013).

Для рейтингової оцінки родовищ титану в межах Новомиргородського розсипного району проаналізовано дані щодо сімох об'єктів: Бірзулівське розсипне родовище, Лікарівський, Андріївський, Валуєвський та Новомиргородський розсипи, а також Східна та Західна ділянки залишкового типу. Було підбрано комплекс параметрів, відомих для всіх об'єктів, які є найбільш показовими та важливими для економічної оцінки родовищ.

Для кожного показника умовно проведено градацію за трибальною шкалою. Кожному родовищу та прояву присвоюються бали за вибраними показниками. Після цього підраховується сума балів, за якою визначається перспективність того чи іншого об'єкта. Більша кількість балів визначає більшу перспективність об'єкта.

© Охоліна Тетяна, Кузьманенко Галина, 2023

Виклад основного матеріалу. Загальна геологічна характеристика об'єктів, що порівнювалися.

Район досліджень розташований у межах північно-східного схилу Українського щита в південній частині Корсунь-Новомиргородського плутону. До його складу входять Бірзулівське родовище, Лікарівський, Андріївський, Валуївський та Новомиргородський розсипи, а також Східна та Західна ділянки залишкового типу. Район зосереджений у межах Лебедин-Балакліївської депресії, що є однією з нижньокрейдових річкових палеодолин на північно-східному схилі центральної частини щита, які розкриваються у Дніпровсько-Донецьку западину. Річкова палеодолина створила своє русло в корі вивітрювання кристалічних порід фундаменту і вивонена продуктами перевідкладення елювію. Мезозойська кора вивітрювання була основним джерелом матеріалу для формування нижньокрейдових континентальних відкладів і пов'язаних з ними корисних копалин, зокрема ільменіту (Крошко, 2016).

Бірзулівське родовище являє собою особливий парагенетичний ряд з рудоносною мезозойською корою вивітрювання та апт-нижньоальбськими континентальними (алювіальними) і верхньоальбськими прибережно-морськими відкладами (Душенко, 2006). Утворення Бірзулівського розсипу напряду пов'язане з Лебедин-Балакліївською ерозійно-тектонічною палеодолиною та діяльністю флювіальних потоків у її межах.

Континентальні відклади нижньої крейди збереглися у вигляді окремих вузьких смуг. Товщина пісків – від 1,5 до 8,9 м, у середньому – 3,0 м. Вміст ільменіту в алювіальних відкладах нерівномірний, по окремих свердловинах змінюється від декількох кілограмів на кубічний метр до 343 кг/м^3 (Крошко, 2016). Максимальний вміст ільменіту становить $75,8 \text{ кг/м}^3$. Найбільш збагачені ільменітом піщані породи, які приурочені до тальвегу палеодолини. Вміст ільменіту у вторинних каолінах в окремих випадках сягає 300 кг/м^3 .

Прибережно-морські глауконіт-кварцові піски нижньої крейди в межах Бірзулівського розсипу представлені мілководними фаціями верхнього альбу, товщина яких досягає 12,0 м. Довжина розсипу – 4 км, ширина – 2 км. Найбільш збагачена ільменітом центральна частина (середній вміст 173 кг/м^3) розсипу. Вміст ільменіту досягає 598 кг/м^3 . У вертикальному розрізі вміст ільменіту збільшується від покрівлі до підшви розсипу.

Повсюдно на кристалічних породах фундаменту залягає кора вивітрювання, що сформована в умовах гумідного клімату та пенепленізації рельєфу. Товщина кори вивітрювання змінюється в широких межах – від 8 до 36 м, у середньому 23 м.

Вміст ільменіту у корі вивітрювання основних порід нерівномірний, підвищується вгору за розрізом до 138 кг/м^3 . Вміст ільменіту в корі вивітрювання гранітів незначний – $0,5\text{--}25 \text{ кг/м}^3$ (Федоренко, 1970).

Лікарівський розсип приурочений до одного з рукавів Лебедин-Балакліївської палеодолини. У геологічній будові беруть участь основні і кислі породи коростенського комплексу, їхня кора вивітрювання та осадові утворення крейдової, палеогенової, неогенової та четвертинної систем. Продуктивна товща Лікарівського розсипу представлена нижньокрейдовими континентальними, елювіально-делювіальними відкладами, що заповнюють давню поховану долину. Континентальні відклади нижньої крейди представлені світло-сірими каоліністими пісками і вторинними каолінами. Товщина відкладів коливається від перших метрів до 15 м, вміст ільменіту – від 40 до 300 кг/м^3 . Товщина розкривних порід становить 79 м.

Андріївський розсип прилягає до Лікарівського в долині р. Велика Вись. У геологічній будові беруть участь граніт-рапаківі коростенського комплексу, їхня кора вивітрювання, ільменітоносні нижньокрейдові континентальні відклади, а також четвертинні відклади. Продуктивна товща представлена алювіально-делювіальними відкладами нижньої крейди, частково четвертинним алювієм, у середній частині ділянки нижньокрейдовими прибережно-морськими пісками. Середня товщина відкладів сягає 6,3 м, середній вміст ільменіту – $57,5 \text{ кг/м}^3$. Глибина залягання товщі – 11,5 м.

Валуївський розсип розташований у 4 км південніше від Бірзулівського родовища, приурочений до верхів'я Лебедин-Балакліївської депресії, у тій частині, де вона замикається. Фундамент складений основними (анортозитами, габро-анортозитами, габро) і кислими породами. Останні трапляються на південно-західній частині ділянки. Крім того, повсюдно розвинена кора вивітрювання. Товщина її змінюється від 1 до 25 м. Вміст ільменіту сягає від 10 до 40 кг/м^3 .

Відклади нижньої крейди мають два фаціальні різновиди: континентальні та прибережно-морські. Континентальні відклади поширені в північно-західній частині Валуївського розсипу і представлені алювіальними утвореннями руслової та заплавної фацій. Товщина континентальних порід – від 1,6 до 8,0 м (у середньому – 2,3 м). Вміст ільменіту збільшується від бортів до центральної частини депресії і досягає 99 кг/м^3 (Федоренко, 1970).

Прибережно-морські відклади представлені глауконіт-кварцовими пісками верхнього альбу. Їхня товщина у середньому становить 5,7 м. Вміст ільменіту нерівномірний – від 25 до 136 кг/м^3 (Федоренко, 1970).

У корі вивітрювання (товщина від 3 до 17 м, у середньому 10 м) вміст ільменіту нерівномірний і збільшується вгору за розрізом від 79 до 112 кг/м^3 (Федоренко, 1970).

Новомиргородський розсип розташований у долині р. Велика Вись. Геологічна будова розсипу проста. Породи осадового чохла практично розмиті річкою. Від четвертинного розмиву залишилися нерозчленовані вугленосні піщано-глинисті відклади нижнього-середнього еоцену, приурочені до Новомиргородської палеодолини. У покрівлі вугленосної товщі залягає четвертинний алювій, у підшви – кора вивітрювання гранітів-рапаківі. Вміст ільменіту в продуктивних пісках нижнього-середнього еоцену 20–70, іноді до 100 кг/м^3 , середній по розсипу – $64,2 \text{ кг/м}^3$.

Східна ділянка залишкового типу. У геологічній будові беруть участь основні породи коростенського комплексу, їхня кора вивітрювання, осадові утворення палеогенової та четвертинної систем. Основні породи представлені анортозитами, габро-анортозитами, габро, габро-норитами, норитами. Вміст TiO_2 в анортозитах становить 0,4–1,2 %, P_2O_5 – 0,5 %. На кристалічних породах повсюдно розвинена кора вивітрювання. У корі вивітрювання виявлено три поряд розташовані площі з підвищеним вмістом ільменіту. Середній вміст ільменіту по Східній ділянці – $107,4 \text{ кг/м}^3$. Товщина відкладів 15 м, розкриву – 38,7 м.

Західна ділянка залишкового типу. Кора вивітрювання розвинена переважно по габро, частково по габро-монцонітам і габро-лабрадоритам. Площа з підвищеним вмістом ільменіту витягнута в субширотному напрямку в зоні ендоконтакту масиву з гранітами Корсунь-Новомиргородського плутону. Глибина залягання кори вивітрювання сягає 48,8 м, товщина відкладів – 7,4 м, середній вміст ільменіту – $112,4 \text{ кг/м}^3$.

Ранжування об'єктів

Геологічні показники. Одним із головних факторів, що визначають промислову цінність об'єкта, є умови залягання покладу корисної копалини. Під час проведення порівняльної оцінки використовуються такі геологічні показники, як товщина продуктивної товщі, коефіцієнт розкриття та складність геологічної будови.

Виділяючи бали для таких показників, як глибина залягання та товщина покладів корисної копалини, враховують їхні граничні значення (для показника "глибина залягання" враховують глибину залягання корисної

копалини для видобування відкритим способом) та поділяють на рівномірні проміжки (Андрєєва, Лижаченко, 2014). Більше балів отримують родовища, що мають більшу товщину продуктивної товщі.

Коефіцієнт розкриття визначає гірничо-технічні умови під час розробки родовища. Для цього показника враховують глибину залягання корисної копалини для видобування відкритим способом. Чим менший коефіцієнт розкриття, тим кращі показники та більше балів отримує об'єкт.

Для ранжування родовищ за складністю геологічної будови використовувалася така градація (табл. 1).

Таблиця 1

Градація за складністю геологічної будови для родовищ твердих корисних копалин (Хмара, 1999)

Складність геологічної будови	Бали
Група 4 (родовища вкрай складної геологічної будови)	0
Група 3 (родовища дуже складної геологічної будови)	1
Група 2 (родовища складної геологічної будови)	2
Група 1 (родовища простої геологічної будови)	3

Усі розглянуті родовища мають другу групу складності та за бальними критеріями отримують 2 бали.

Якісні показники. Для геолого-економічної оцінки родовищ, крім геологічних, важливими є якісні показники. Оцінюючи якість тієї чи іншої мінеральної сировини, підбирають показники, характерні для конкретного виду сировини. Так, для титанових родовищ якість визначають головним чином за вмістом ільменіту в пісках (в кг/м³). Вищий бал отримують родовища з вищим вмістом ільменіту в пісках.

Ще одним дуже важливим критерієм, що характеризує якість сировини, є наявність шкідливих домішок, вміст яких визначає мінімальну або максимальну кількість балів. Отже, мінімум балів отримують руди, що містять домішки P₂O₅ і Cr₂O₃, максимум балів – руди без шкідливих домішок.

Аналіз родовищ за змінністю ільменіту проводився з урахуванням середнього вмісту в ньому діоксиду титану. Якщо передбачається використання ільменіту в пігментній промисловості, то найбільший бал має родовище з меншими показниками змінності ільменіту. У нашому випадку титаноносний район спеціалізується на металічний титан – чим більша змінність ільменіту, тим більше балів отримує родовище.

Економічні показники. Величина запасів чи ресурсів корисної копалини є головними чинниками доцільності освоєння та розробки родовища, тому найбільшу кількість балів присвоєно родовищам з більшою кількістю та вищою категорією запасів і ресурсів. Оскільки за стандартною класифікацією (Крейтер, 1973) більшість розглянутих титаноносних об'єктів належить до дрібних, для більш адекватної оцінки автори ввели свою градацію родовищ: за запасами руди, ільменіту та діоксиду титану.

Для розрахунку основних економічних показників важливо визначити термін експлуатації родовища, оскільки у розрахунках виробничих витрат вихід продукції на одиницю часу також повинен враховуватись. Чим більший вихід у день або на рік, тим нижчі витрати на тонну руди.

Для підрахунку оптимального терміну експлуатації в сучасній літературі найчастіше використовують формулу Тейлора (Коржнев та ін., 2006)

$$CE = 6,5 \sqrt{\text{тоннаж, млн т.}}$$

Потужність підприємства характеризує оптимально можливий випуск продукції за рік за умови якнайповнішого використання устаткування і виробничих площ,

застосування прогресивної технології та організації виробництва. Оптимальна продуктивна потужність підприємства визначається шляхом поділу об'єму геологічних запасів "пісків" на оптимальний термін експлуатації родовища (тис. м³/рік). Для кожного родовища вона має різні показники. Найбільшу кількість балів отримують родовища, які мають найбільшу продуктивну потужність, оскільки в такому разі швидше реалізується термін окупності підприємства і воно буде більш економічно ефективним.

Промислове значення об'єкта визначається за формулою, яку отримують як частку від добутку, де враховані найвагоміші дані з погляду авторів, а саме, бали, отримані в результаті оцінки родовищ розсипних районів: *об'єм геологічних запасів діоксиду титану + вміст діоксиду титану + промислове значення супутніх корисних копалин + коефіцієнт розкриття*.

У табл. 2 показано ранжування об'єктів Новомиргородського титаноносного району, де враховано основні показники, за якими проводилася бальна оцінка.

Висновки

Порівняльну геолого-економічну оцінку родовищ титанових руд Новомиргородського розсипного району наведено на рис. 1. Виходячи з методики порівняльної геолого-економічної оцінки, найбільшу кількість балів, а отже і промислову цінність, мають Східна та Західна ділянки залишкового типу. На сьогодні Україна не має досконалої технології освоєння родовищ залишкового типу. Родовища розсипного типу менш затратні у розробці, тому слід звернути увагу саме на них. Найпривабливішим серед розсипів із кількістю балів 24 є Бірзулівське родовище, яке з 2012 р. розробляє ТОВ ВКФ "Велта", а з 2019 вона володіє також Лікарівським розсипом, який отримав 17 балів. Андріївський розсип із сумою балів 19 є більш привабливим, тому варто рекомендувати його для першочергового відпрацювання після Бірзулівського родовища. Валуєвський та Новомиргородський розсипи отримали 15 та 8 балів відповідно. Їх можна рекомендувати як резервні для відпрацювання існуючого ГЗК.

Використання бальної шкали дає змогу порівнювати об'єкти з різним ступенем вивченості і може застосовуватись для визначення перспективності будь-якого родовища серед низки об'єктів за обмеженої кількості інформації. Під час подальших досліджень родовищ і проявів та з появою нових геологічних та економічних даних можливо переоцінювати об'єкти і проводити такі рекомендації.

Таблиця 2

Бальна оцінка розсипних титаносисних родовищ Новомиргородського розсипного району

Назва родовища/розсипу	Середня товщина пласта	Коефіцієнт розкриття	Складність геологічної будови	Вміст ільменіту в пісках	Вміст діоксиду титану	Шкідливі домішки	Об'єм геологічних запасів пісків, тис. м ³	Об'єм геологічних запасів ільменіту, тис. т	Об'єм геологічних запасів діоксиду титану, тис. т	Оптимальний строк експлуатації	Оптимальна продуктивна потужність підприємства, тис. м ³ /рік	Промислове значення	Сума балів
Бірюлівське	0	1	2	1	2	3	3	3	3	2	2	2	24
Лікарівський	2	1	2	3	0	1	2	2	1	1	1	1	17
Андріївський	1	2	2	0	2	3	2	2	1	1	1	2	19
Валуївський	1	1	2	1	2	3	1	1	0	1	1	1	15
Новомиргородський	0	2	2	0	0	3	0	1	0	0	0	0	8
Східна ділянка	3	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	32
Західна ділянка	1	1	2	3	2	3	3	3	2	2	3	2	27

Перспективність об'єктів

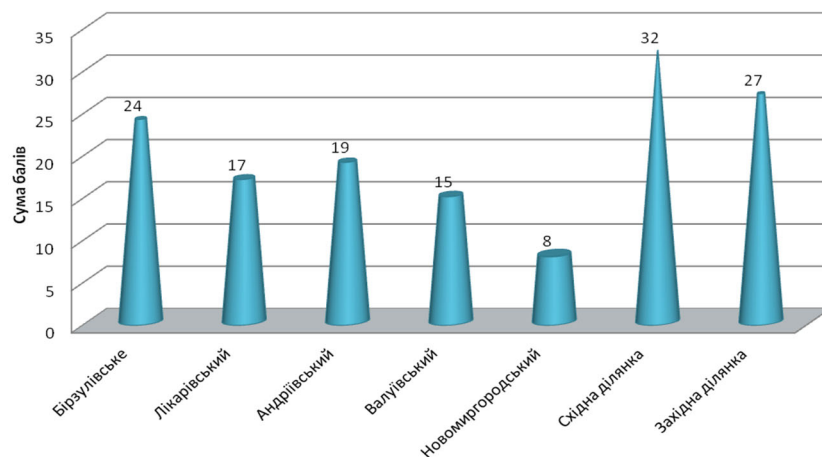


Рис. 1. Порівняльна геолого-економічна оцінка Новомиргородського титаносисного розсипного району

Подяки, джерела фінансування. Роботу профінансовано за рахунок програми "Наукові і науково-технічні (експериментальні) роботи за пріоритетним напрямом "Технології пошуку, видобутку, переробки та використання критичних корисних копалин, проблеми оцінювання, збереження та повоєнного відновлення довкілля" на 2023–2024 рр. "Стратегічна мінеральна сировина для відновлення економіки України: аналіз ресурсів та запасів, розробка критеріїв пошуку для нарощування їх мінерально-сировинної бази" Державний реєстраційний номер: 0123U100855.

Список використаних джерел

- Андреева, О. (2009). Оцінка бентонітових родовищ України за допомогою бальної оцінки. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 46, 55–59.
- Андреева, О.О., Лижаченко, Н.М. (2014). Застосування порівняльних методів оцінки при визначенні промислової цінності родовищ корисних копалин. *Вісник ОНУ. Сер. Географічні та геологічні науки*, 19(4), 251–257.
- Душенко, І.С. (2006). Звіт про результати детальної розвідки Бірюлівського розсипного родовища ільменіту в Кіровоградській області. Дніпропетровськ.
- Коржнев, М.М., Михайлов, В.А., Міщенко, В.С., Плотников, О.В. та ін. (2006). Основи економічної геології. Логос.
- Крейтер, В.М. (1973). Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Высшая школа.
- Крошко, Ю.В. (2016). Цифрові структурно-літологічні моделі нижньокрейдаєвих континентальних розсипів ільменіту у верхній палеотечії Лебедина-Балакліївської палеодолини (центральна частина Українського щита). *Геоінформатика*, 3(59), 49–57.
- Курило, М.М., Андреева, О.О. (2014). Економічна геологія: Методичні рекомендації до виконання практичних робіт для студентів геологічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Ніка-Центр.
- Лижаченко, Н.М. (2012). Порівняльна геолого-промислова оцінка графітових родовищ України. *Геолог України*, 4, 78–85.

Лижаченко, Н.М. (2012). Ранжування вітчизняних родовищ графіту за основними геолого-промисловими показниками. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 59, 34–38.

Лижаченко, Н.М. (2021). Аналіз мінерально-сировинної бази графіту Українського щита з використанням методик геолого-економічної оцінки. *Геологічний журнал*, 1(374), 70–80.

Михайлов, В., Загнітко, В., Курило, Н. (2017). Перспективи інвестицій в мінерально-сировинний комплекс України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 76, 47–51.

Михайлов, В., Курило, М., Андреева, О., Шнюков, С. (2022). Перспективи промислової рудоносності прояву міді Жиричі. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(97), 66–73.

Михайлов, В.А. (2023). Стратегічні корисні копалини України та їхня інвестиційна привабливість. http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/Stratehichni_Korysni_Kopalyny.pdf

Михайлов, В.А., Курило, М.М. (2010). Мінерально-сировинна база флюсової сировини України. Ніка-Центр.

Михайлов, В.А., Курило, М.М., Бондар, Ю.О. (2011). Застосування методик геолого-економічного аналізу при комплексних оцінках геологічних пам'яток Волино-Поділля. *Вісник Національного науково-природничого музею*, 9, 43–47.

Рудько, Г.І., Курило, М.М., Радованов, С.В. (2011). Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин. АДЕФ – Україна.

Сивальнева, Т.В. (2012). Оценка титаносисных россыпей с целью выделения перспективных объектов Волынского района. *Матеріали Х Міжнародної конференції "Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану середовища", 17–20 жовтня 2012 р., м. Київ*, 207–209.

Сивальнева, Т.В. (2013). Геолого-економічна оцінка титанових месторождений Волынского титаносисного района с построением модели одного из перспективных объектов. *Зб. наук. пр. ІГН НАН України*, 6, 123–128.

Сивальнева, Т.В. (2013). Рейтинговий підхід к геолого-економічній оцінці титанових месторождений с построением модели одного из перспективных объектов Волынского титаносисного района. *Матеріали Міжнародної конференції "Ti-2013 в СНГ", 26–29 травня 2013 р., Донецьк*, 106–110.

Скоробач, В.И., Кармазенко, В.Г., Гречушкина, Т.А. (1979). Отчет о результатах поисков новых россыпных и остаточных месторождений ильменита в пределах площади распространения основных пород Новомиргородского и Вороновского массивов за 1977–1979 гг. Т. V. Киев.

Скоробач, В.И., Тарасенко, В.С., Шкурченко, И.Е. (1983). Отчет о результатах поисков титановых руд на перспективных участках южной части Корсунь-Новомиргородского плутона за 1980–1983 гг. Т. I. Киев.

Федоренко, Н.С. (1970). О результатах поисков ильменитовых россыпей в Среднем Приднепровье среди песчаных отложений нижнего мела. *Производственный отчет*. Киев.

Хмара, А.Я. (1999). Методика определения группы месторождений твердых полезных ископаемых по сложности геологического строения. *Мінеральні ресурси України*, 2, 23–25.

References

Andreeva, O. (2009). Assessment of bentonite deposits of Ukraine using point assessment. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 46, 55–59 [in Ukrainian].

Andreeva, O.O., Lyzhachenko, N.M. (2014). Use of comparative assessment methods in determining industrial value of mineral deposits. *Visnyk of Odessa National University: Geographical and geological sciences*, 19(4), 251–257 [in Ukrainian].

Dushenko, I.S. (2006). Report on the results of detailed exploration of the Birzuliv placer ilmenite deposit in the Kirovohrad region. Dnipropetrovsk [in Ukrainian].

Fedorenko, N.S. (1970). On the results of the search for ilmenite placers in the Middle Dnieper region among the sandy deposits of the Lower Cretaceous: a production report. Kyiv [in Russian].

Khmara, A.Ya. (1999). Methodology for determining a group of deposits of solid minerals by the complexity of the geological structure. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 23–25 [in Russian].

Korzhnev, M.M., Mykhailov, V.A., Mishchenko, V.S., Plotnikov, O.V. et al. (2006). Basics of economic geology. Logos [in Ukrainian].

Kreyter, V.M. (1973). Search and exploration of mineral deposits. Higher School [in Russian].

Kroshko, Yu.V. (2016). Digital structural and lithological models of Lower Cretaceous continental ilmenite placers in the upper paleoocurrent of the Lebedyn-Balakliiv paleovalley (central part of the Ukrainian shield). *Geoinformatics*, 3 (59), 49–57 [in Ukrainian].

Kurylo, M.M., Andreeva, O.O. (2014). Economic geology: Methodological recommendations for the implementation of practical work for students of geological specialties of higher educational institutions. Nika Center [in Ukrainian].

Lyzhachenko, N.M. (2012). Comparative geological and industrial assessment of graphite deposits of Ukraine. *Geologist of Ukraine*, 4, 78–85 [in Ukrainian].

Lyzhachenko, N.M. (2012). Ranking of domestic graphite deposits according to the main geological and industrial indicators. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 59, 34–38 [in Ukrainian].

Lyzhachenko, N.M. (2021). Analysis of the mineral-raw material base of graphite of the Ukrainian shield using methods of geological and economic assessment. *Geological journal*, 1(374), 70–80 [in Ukrainian].

Mykhailov, V., Kurylo, M., Andreeva, O., Shnyukov, S. (2022). Prospects of industrial ore-bearing of Zhyrychi copper manifestation. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 4(97), 66–73 [in Ukrainian].

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

Mykhailov, V.A., Kurylo, M.M. (2010). Mineral and raw material base of flux raw materials of Ukraine. Nika Center [in Ukrainian].

Mykhailov V.A., Kurylo M.M., Bondar Yu.O. (2011). Application of geological and economic analysis methods in complex evaluations of geological monuments of Volyn-Podillia. *Visnyk of National Science and Nature Museum*, 9, 43–47 [in Ukrainian].

Mykhailov V., Zagnitko V., Kurylo N. (2017). Prospects for investment in the mineral complex of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 76, 47–51 [in Ukrainian].

Rudko, G.I., Kurylo, M.M., Radavanov, S.V. (2011). Geological and economic assessment of mineral deposits. ADEF – Ukraine [in Ukrainian].

Skorobach, V.I., Karmazenko, V.G., Grechushkina, T.A. (1979). Report on the results of prospecting for new placer and residual deposits of ilmenite within the distribution area of the main rocks of the Novomyrhorod and Voronov massifs for 1977–1979. Vol. V. Kyiv [in Russian].

Skorobach, V.I., Tarasenko, V.S., Shkurenko, I.E. (1983). Report on the results of prospecting for titanium ores in promising areas of the southern part of the Korsun-Novomyrhorod pluton for 1980–1983. Vol. I. Kyiv [in Russian].

Svivalneva, T.V. (2012). Evaluation of titanium-bearing placers in order to identify promising objects of the Volyn region. *Proceedings of the X International Conference "Monitoring of geological processes and the ecological state of the medium"*, 17–20 June 2012, Kiev, 207–209 [in Russian].

Svivalneva, T.V. (2013). Geological and economic assessment of titanium deposits in the Volyn titanium-bearing region with the construction of a model of one of the promising objects. *Scientific proceedings of IGN NAS of Ukraine*, 6, 123–128 [in Russian].

Svivalneva, T.V. (2013). Rating approach to the geological and economic assessment of titanium deposits with the construction of a model of one of the promising objects of the Volyn titanium-bearing region. *Proceedings of the International Conference "Ti-2013 in the CIS"*, May 26–29, 2013, Donetsk [in Russian].

Отримано редакцією журналу / Received: 06.05.23

Прорецензовано / Revised: 23.07.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Tetiana OKHOLINA, PhD (Geol.), Senior Researcher,
e-mail: svilya@ukr.net

Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Halyna KUZMANENKO, PhD (Geol.), Researcher
e-mail: geology7@ukr.net

Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

COMPARATIVE GEOLOGICAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF THE TITANIUM DEPOSITS OF UKRAINE USING THE EXAMPLE OF THE NOVOMYRHOROD PLACERS DISTRICT

The article considers one of the methods of geological and economic assessment – ranking of titanium ore deposits on a point scale on the example of the Novomyrhorod placer district, which includes the Birzulivske deposit, Likarivske, Andriivske, Valuivske, Novomyrhorod placers, as well as the Eastern and Western residual areas. A brief geological description of the compared titanium objects is given, as well as the geological, qualitative and economic indicators are used to make a comparative geological and economic assessment of the studied deposits and placers. The use of a scoring scale allows comparing objects with different degrees of exploration and can be used to determine the prospects of any deposit among a number of objects with a limited amount of information.

Keywords: titanium deposits, rating assessment, Novomyrhorod placer district.

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

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

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.4:681.88:[551.312.3:502.51]
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.10>

Володимир ЄМЕЛЬЯНОВ¹, д-р геол.-мінералог. наук, член-кор. НАН України
ORCID ID: 0000-0002-8972-0754
e-mail: eva@nas.gov.ua

Євген НАСЄДКІН², канд. геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0003-2633-9291
e-mail: nasedevg@ukr.net

Сергій ФЕДОСЕЄНКОВ³, канд. геол. наук
e-mail: fedoseenkov@nas.gov.ua

Тетяна КОШЛЯКОВА⁴, канд. геол. наук, ст. дослідник
ORCID ID: 0000-0001-8551-3531
e-mail: tatianakoshliakova@gmail.com

¹Державна наукова установа "Центр проблем морської геології, геоелектрогеології та осадового рудоутворення НАН України", Київ, Україна

²Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна

³Державна установа "Науковий гідрофізичний центр НАН України", Київ, Україна

⁴Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України, Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ ПІД ЧАС ГЕОХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ РОЗПОДІЛУ ЗАБРУДНЮВАЧІВ У ПОВЕРХНЕВОМУ ШАРІ ДОННИХ ВІДКЛАДІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. наук. співроб. О.Л. Шевченком)

Представлено результати, отримані в ході тривалих натурних досліджень особливостей розподілу металомісної компоненти осадової речовини в межах територій промислових міст, зокрема Запоріжжя. Ґрунтуючись на контактних та дистанційних дослідженнях, вивчено один з аспектів проблеми, а саме особливості розподілу концентрацій заліза в поверхневому шарі донних відкладів Дніпра. Окреслено коло практичних підходів до застосування нового комплексного методу польових спостережень, що поєднує можливості експресної площинної зйомки з визначенням геохімічних характеристик річкових осадків. Обґрунтовано методологію поєднання контактних геохімічних досліджень розподілу заліза в поверхневих донних відкладах з виконанням бічного огляду дистанційної площинної зйомки за допомогою гідролокатора. Водночас передбачається можливість визначення літологічних відмінностей поверхневого шару донних відкладів за умов визначення середніх концентрацій заліза для основних речовинних типів осадків. Результати дворічних досліджень на основі даних польових робіт виявили певні перспективи розвитку такого комплексу спостережень у разі систематизації напрямку, додаткової апробації технологічної складової на різних тестових ділянках акваторії, а також напрацювання відповідного методичного підґрунтя.

Ключові слова: геоелектрогеологія, донні відклади, дистанційна площинна зйомка, гідроакустичні методи, контактні геохімічні дослідження.

Постановка проблеми. Поглиблення людської діяльності в усіх сферах природокористування, створюючи різноманітні екологічні проблеми, одночасно визначає нові об'єкти досліджень і розвиток дослідницьких технологій. Однією з таких проблем, що має сталу основу та стійкий тренд до ускладнення, є забруднення об'єктів навколишнього середовища побічними продуктами процесів переробки корисних копалин, зокрема залізних і кольорових руд. Багаторічному вивченню питання привнесення з промислових територій забруднювачів, зокрема в межах металургійних осередків, присвячено спільні натурні дослідження Інституту геологічних наук НАН України, Державних наукових установ "Центр проблем морської геології, геоелектрогеології та осадового рудоутворення НАН України" та "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України" у межах міста Запоріжжя. Дослідження розподілу заліза та низки важких металів у складі різних компонентів довкілля відбувається на основі постійного відбору речовини седиментаційних потоків з атмосферного та водного середовища, вивчаються на предмет забруднення важкими металами поверхневі ґрунти території Запоріжжя та донні відклади Дніпра в межах міста (Митропольський та ін., 2017).

Для періодичних досліджень стану донних відкладів було створено експериментальний полігон – обрано довільну ділянку акваторії Дніпра в межах південної частини міста, що межує з територією причалу Державної установи "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук

України" (Гончар та Федосєєнков, 2016, 2017). Віддаленість від найбільших осередків забруднення (території підприємств ПАТ "Запоріжсталь", ПрАТ "Дніпроспецсталь" тощо) ділянки становить десять кілометрів, що унеможливіє прямий вплив їх функціонування на стан донних відкладів та задовольняє вимоги проведення експерименту. Виходячи з аналізу річкових карт, обрана для спостережень ділянка акваторії включає фрагменти дна з ознаками акумуляції донних відкладів та їх розмиву і вирізняється суттєвими перепадами глибин, що визначає присутність різних типів осадової речовини у складі верхнього шару донних відкладів.

Експериментальною складовою комплексу польових спостережень, що на технічно досяжному рівні дозволяє проводити дистанційну площинну зйомку розподілу залізо-вмісної компоненти поверхневих донних відкладів, стало залучення гідролокатора бокового огляду до геохімічних досліджень (Ємельянов та ін., 2019). Перші дані, отримані в ході польових робіт, виявили певні перспективи розвитку такого комплексу спостережень у разі реалізації достатнього обсягу польових і лабораторних досліджень.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Останніми роками з'явилося чимало вітчизняних і закордонних публікацій, присвячених застосуванню гідроакустичних методів для вивчення донних відкладів поверхневих водних об'єктів (Ostrovsky and Tegowski, 2010; Anderson and Pacheco, 2011; Гончар и др., 2012, 2014; Mytropolskyi et al., 2016; Гончар та Федосєєнков, 2016,

© Ємельянов Володимир, Насєдкін Євген, Федосєєнков Сергій, Кошлякова Тетяна, 2023

2017; Митропольський та ін., 2017; Ємельянов та ін., 2019; Papeeteier et al., 2020). Проте в літературі мало уваги приділяється комплексним еколого-геохімічним дослідженням, здійсненим із застосуванням дистанційної площинної зйомки. Крім того, зазвичай фахівці представляють результати короткострокових обстежень, що не дає змоги оцінити закономірності розподілу хімічних елементів у водному середовищі та осадовій речовині річок та озер у багаторічному розрізі.

Мета досліджень – розробити методичну основу та обґрунтувати поєднання контактних геохімічних досліджень розподілу металовмісної компоненти в поверхневих донних відкладах з виконанням бічного огляду дистанційної площинної зйомки за допомогою гідролокатора.

У статті наведено результати тривалих натурних спостережень за особливостями розподілу заліза в осадовій речовині Дніпра в межах міста Запоріжжя.

Методичне обґрунтування застосування гідроакустичних методів. Геохімічні контактні дослідження засвідчили низку особливостей перебування побічних продуктів металургійного виробництва у складі поверхневого шару донних відкладів Дніпра в межах міста Запоріжжя. У цілому, загальний вміст заліза у складі компонентів водного середовища сягає високих значень, значно перевищуючи середні показники для фонових ділянок дніпровських вод у середній течії річки (Митропольський та ін., 2017). За результатами моніторингу екологічного стану поверхневих вод у межах досліджуваної території, що здійснює Запорізьке регіональне управління водних ресурсів, вміст заліза у воді сягає в середньому $0,25 \text{ г/м}^3$, перевищуючи рибгосподарські орієнтовно безпечні рівні впливу у 2,5 рази. Осереднення отриманих нами даних щодо розподілу основних компонентів верхнього шару донних відкладів у Дніпрі на визначеній ділянці в межах міста засвідчило, що вміст оксиду заліза також є досить значним – до 13 % в загальному розподілі основних оксидів для сухої речовини проб. Водночас коливання розподілу значень металовмісної компоненти сягають істотних значень для різних періодів відбору натурної речовини, що прив'язані до сезонного циклу.

Узагальнення результатів електронномікроскопічних досліджень та хімічного аналізу проб за період спостережень засвідчили помітну роль металовмісних частинок у формуванні основної фази мінеральної компоненти донних осадків дрібноалевритової та пелітової розмірності.

Основним джерелом пересування Fe_2O_3 є потоки дрібнодисперсної завислої речовини, які формують верхній шар осадків на певних ділянках відповідно до підводного

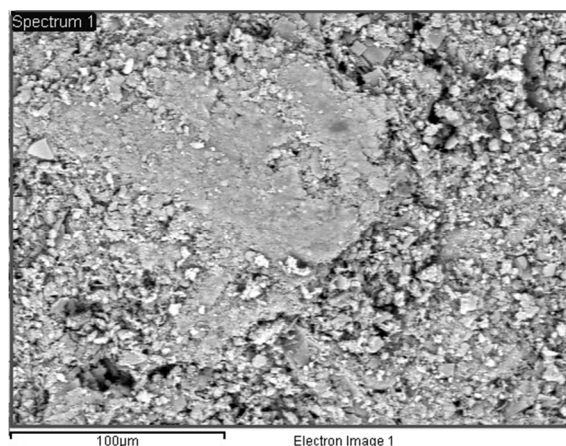
рельєфу за умов мінімальної гідродинамічної активності водного шару акваторії. У той самий час ділянки дна, в межах яких водним потокам властиві течії та гідродинамічні збурення, визначаються переважною присутністю псамітової складової осадків на своїй поверхні. Зазвичай у межах району досліджень такі ділянки представлені мінеральною компонентою кварцових пісків різної розмірності з мінімальною присутністю дрібнодисперсної залізистовмісної складової (Mytropolskyi et al., 2016).

Отже, особливості розподілу в донних відкладах Fe_2O_3 , за певних узагальнень та припущень, визначаються наявністю двох основних літологічних типів осадків поверхневого шару:

1. Відклади, представлені збагаченою металовмісним компонентом дрібнодисперсною алеврито-пелітовою речовиною, що складається зі змішаношаруватих утворень хлорит-іліт-монтморилоніту та скелетних залишків кременистих мікроводоростей. Електронномікроскопічний знімок зразка цих відкладів та його хімічний склад зображено на рис. 1.

2. Відклади, представлені обкатаними уламками кварцу та фрагментами польових шпатів піщаної розмірності з незначною домішкою агрегованої пелітової складової (змішаношаруваті утворення хлорит-іліт-монтморилоніту). Електронномікроскопічний знімок зразка цих відкладів та його хімічний склад зображено на рис. 2.

Таблиці хімічного складу проб вказують на суттєве збагачення низкою металів речовини, представлені дрібнодисперсною компонентою, і зниження їх вмісту у відкладах піщаної розмірності. Загалом такі особливості відомі з літературних джерел (Митропольський та др., 1982) для різних літологічних та речовинно-генетичних типів донних відкладів Чорного моря. За опублікованими літературними даними, це пов'язано з певним мінеральним складом, а також природними властивостями різних гранулометричних відмінностей донних відкладів накопичувати в собі з водного середовища низку мікроелементів. Контактні дослідження верхнього шару донних відкладів на ділянці спостережень у межах акваторії Дніпра, що слугує експериментальним полігоном для проведення зазначених геохімічних і геофізичних спостережень (рис. 3), дали змогу виявити фактор залежності розподілу металовмісної компоненти від гранулометричного складу осадків. Це, у свою чергу, дозволило розглядати розподіл літологічних типів сучасних донних відкладів у межах локальних ділянок акваторій як один з показників накопичення та розподілу Fe_2O_3 – від мінімальних показників у кварцових пісках до максимальних – у мулистих дрібнодисперсних відкладах.



Element	Weight%	Atomic%	Compd%	Formula
Mg K	0.87	0.81	1.44	MgO
Al K	3.58	3.02	6.76	Al ₂ O ₃
Si K	27.86	22.59	59.61	SiO ₂
K K	1.07	0.62	1.29	K ₂ O
Ca K	5.49	3.12	7.68	CaO
Mn K	4.55	1.89	5.87	MnO
Fe K	10.84	4.42	15.49	Fe ₂ O ₃
Cu K	1.49	0.53	1.86	CuO
O	44.26	63.00		
Totals	100.00			

Рис. 1. Електронномікроскопічний знімок та хімічний склад зразка відкладів, представлених збагаченою залізом дрібнодисперсною алеврито-пелітовою речовиною

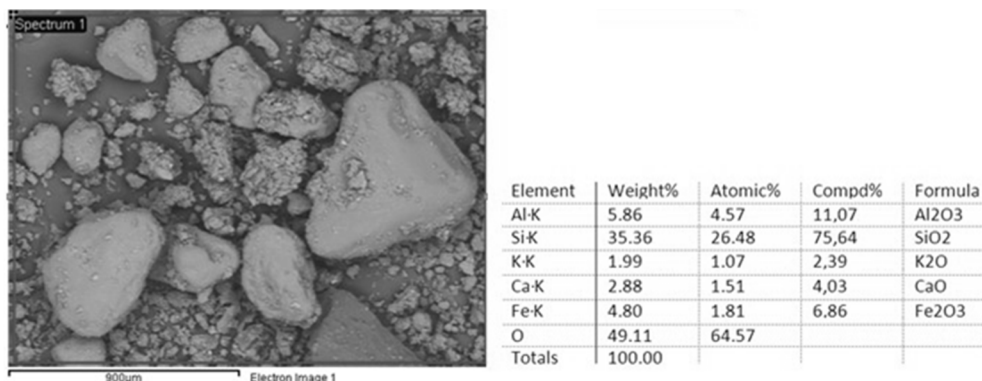


Рис. 2. Електронномікроскопічний знімок та хімічний склад зразка відкладів, представлених обкатаними уламками зерен кварцу та фрагментами польових шпатів піщаної розмірності

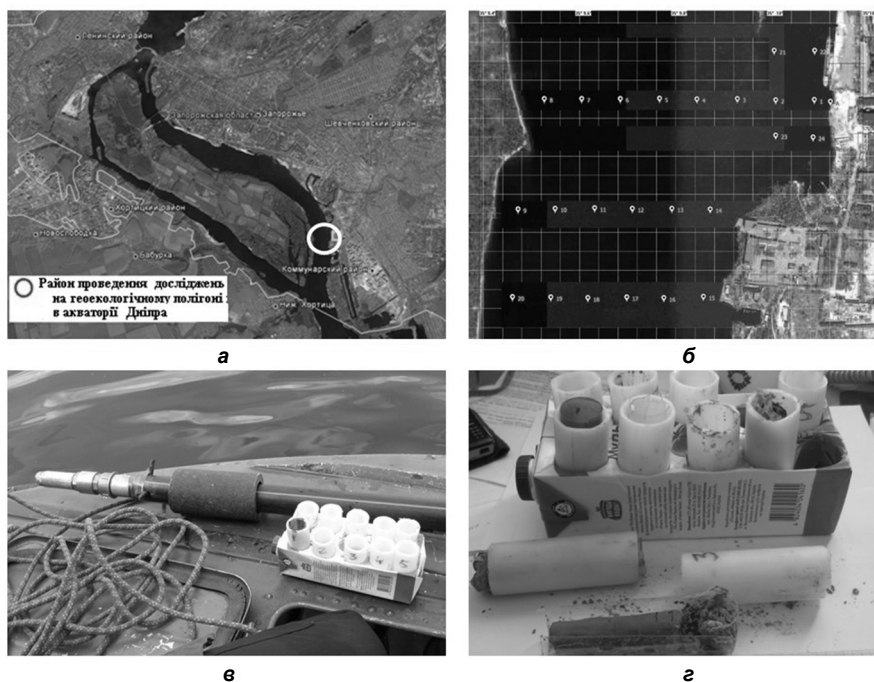


Рис. 3. Експериментальний полігон

а – район проведення дистанційних геофізичних та контактних геохімічних досліджень в акваторії Дніпра в межах міста Запоріжжя;
 б – дослідницький полігон у межах акваторії з помітками точок пробовідбору верхнього шару донних відкладів;
 в – ґрунтова прямоточна трубка та обойма вкладишів для відбору колонок ґрунту; г – процес відокремлення зразка поверхневого шару донних відкладів (0–1 см) з колонки, зафіксованої вкладишем із ґрунтової трубки

Протягом періоду досліджень було проведено декілька контактних ґрунтових зйомок, усереднено дані щодо вмісту заліза в певних типах донних відкладів та визначено кореляційні зв'язки між геохімічними властивостями та гранулометричним складом поверхневого шару річкових осадків.

Методичне обґрунтування застосування гідроакустичних методів. Геофізична складова. На сьогодні розвиток дистанційних безконтактних методів набув широкого застосування майже в усіх сферах людської діяльності – від засобів медичної діагностики до досліджень далеких космічних об'єктів. Історія застосування дистанційних методів у вивченні земних надр сягає понад 100 років, починаючи від першого використання геофізичних систем під час польових досліджень для визначення підземних геологічних структур, зокрема природних пасток для нафти і газу. Нині створюються нові методики та технологічні рішення, на базі яких вирішуються складні завдання досліджень, збільшується роздільна здатність,

дистанція, площа спостережень, комплексність застосування геофізичних методів (Гончар та Федосєєнков, 2017).

Одним із найефективніших засобів дистанційного дослідження геоморфології дна акваторій та визначення літологічних типів поверхневих шарів донних відкладів є системи високочастотної гідролокації (Гончар та Федосєєнков, 2016). У Державній установі "Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України" було створено автоматизований модульно-блочний інформаційно-вимірювальний геоакустичний комплекс (рис. 4), який із прив'язкою до координат і часу здійснює:

- детальне дослідження рельєфу дна акваторій (за площею) з використанням гідролокатора бокового огляду (ГБО) з частотами від 29 кГц до 470 кГц на глибинах до 500 м;
- стратифікацію шарів донних відкладів за допомогою гідроакустичного профілографа з частотами від 3 кГц до 29 кГц на глибинах до 800 м;
- обстеження дна та знайдених об'єктів підводною камерою.

Для отримання геоакустичних параметрів морського та річкового дна було розроблено математичний апарат та програмне забезпечення для обробки інформації гідрогеоакустичного комплексу. Розроблена методика дистанційної профільної геоакустичної зйомки дна передбачає отримання інформації щодо безперервних профілів шарів донних відкладів, а на основі

аналізу акустичних трас – щодо геоакустичних властивостей осадків. Шляхом обробки відбитих гідроакустичних сигналів визначаються такі геоакустичні параметри донних відкладів, як густина, швидкість поширення пружних коливань (швидкість звуку), коефіцієнти відбиття, поглинання акустичних сигналів у відкладах, донна реверберація.

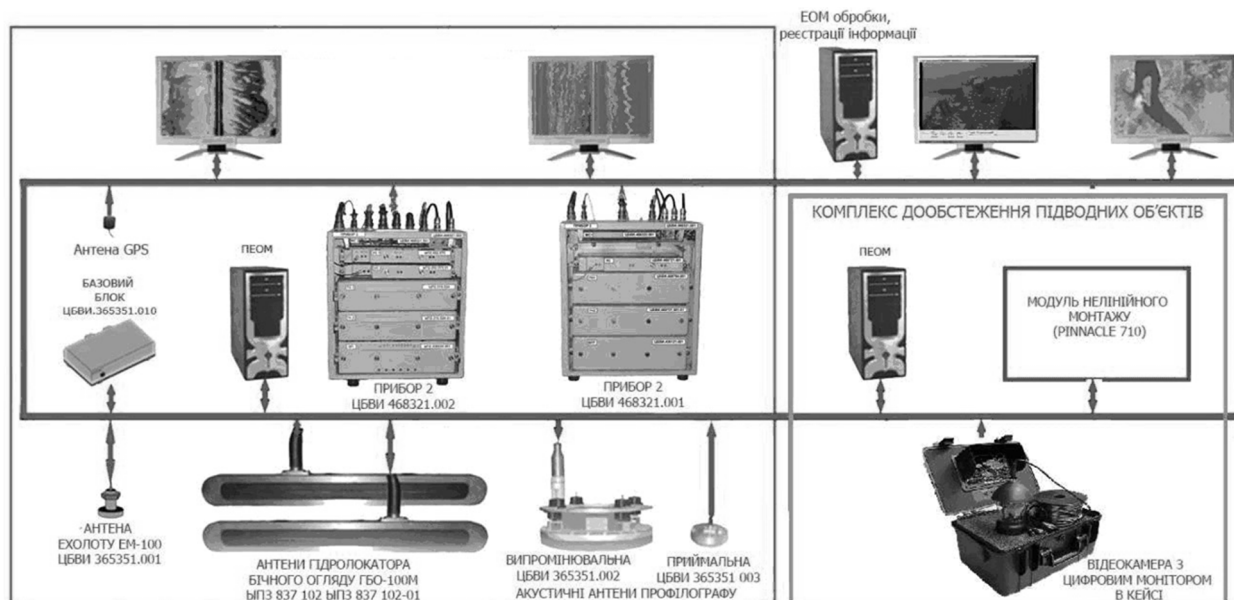


Рис. 4. Структура та компоненти геоакустичного автоматизованого модульно-блокового інформаційно-вимірювального комплексу

Протягом періоду досліджень було побудовано спектри відбитих сигналів та створено еталонну таблицю кореляційних залежностей геоакустичних параметрів донних відкладів за характеристикою спектра, що дало змогу вирішувати зворотні задачі – визначати літологічні типи донних відкладів за відбитим сигналом.

Розроблена геоакустична система забезпечила оптимальне виконання комплексного обстеження полігону, у процесі якого проводиться одночасно дистанційна зйомка дна та відбір проб донних відкладів. За даними проведеного профілювання дистанційним методом було визначено геоакустичні параметри поверхневого шару осадків обраної території та класифіковано неоднорідні шари з відсотковими показниками поєднання декількох літологічних класів. Водночас, з метою запобігання можливим похибкам, пов'язаним із сезонними змінами в процесах осадконакопичення (Гончар и др., 2012), дослідження акустичних властивостей поверхневих донних відкладів проводилися в теплий і холодний періоди року. Це дало змогу визначити, що щільність верхнього шару донних відкладів улітку становила 1440–1890 кг/м³ зі стандартним відхиленням щільності від середніх значень 91 кг/м³ та коефіцієнтом варіації 4,97 %, а восени, відповідно, 1390–1730 кг/м³ зі стандартним відхиленням 88 кг/м³ та коефіцієнтом варіації 5,04 %. Завдяки дослідженню простежено незначну зміну геоакустичних параметрів верхнього шару донних відкладів обстеженого полігону в різні сезони за рахунок зміни концентрації мулів у верхньому шарі донних відкладів.

Результати досліджень. Використання гідроакустичного профілографа дало змогу отримати профілі дна обстеженого полігону з високою розрізняльністю здатністю у вертикальній проекції. Водночас параметри апаратури визначили якісне зондування чохла осадкового шару до корінних порід, представлених

гранітами Українського щита, а обробка отриманих профілограм за допомогою розроблених алгоритмів та програмного забезпечення – отримання даних щодо щільності, потужності і літологічних розрізів шарів донних осадів обстеженого полігону (рис. 5). Під час виділення типів осадків було використано класифікацію П.Л. Безрукова і А.П. Лісіцина (Безруков і Лісицын, 1960), за якою як основні показники гранулометричного складу прийняті вміст переважної фракції і середній діаметр частинок. Гранулометричний і хімічний аналізи проб донних відкладів, відібраних малою ґрунтовою трубкою, забезпечили контроль дистанційних методів і доповнення моделей, що створювалися на основі дистанційних даних.

Практичні результати досліджень такі: осадконакопичення в межах полігону контролюється гідрологічними і геолого-геоморфологічними факторами – на ділянках з більш вирівняним рельєфом, до яких належить верхня за течією частина полігону з глибиною 8–10 м, поширені одноманітні за розмірністю осадки. До цих ділянок приурочені добре сортовані кварцові піски, що містять зазвичай 90–95 % частинок розмірністю 1–0,1 мм з незначними домішками дрібно-алевритових частинок (0,05–0,01 мм). Водночас вміст заліза у верхньому шарі таких ділянок не перевищує 5 %, незначно коливаючись у межах цього значення.

Для інших частин полігону характерний більш складний рельєф дна, що позначається і на розподілі осадкового матеріалу. У нижній частині ділянки спостерігаються виходи корінних порід, перекритих малопотужним (до 5 см) шаром алювіальних відкладів, проте аналіз розподілу гранулометричних фракцій осадкового матеріалу на дні дає досить повне уявлення про локалізацію та мілілість верхнього шару донних відкладів у межах полігону (рис. 6).

Загальний характер розподілу матеріалу псамітової розмірності проявляється досить чітко – його максимальні концентрації пов'язані безпосередньо з ділянками розмиву берега о. Хортиця, де глибина води не

перевищує 1–3 м. Достатньо якісна сортованість піщаних відкладів також визначає відсоток вмісту оксиду заліза, що становить 4,5–6 %.

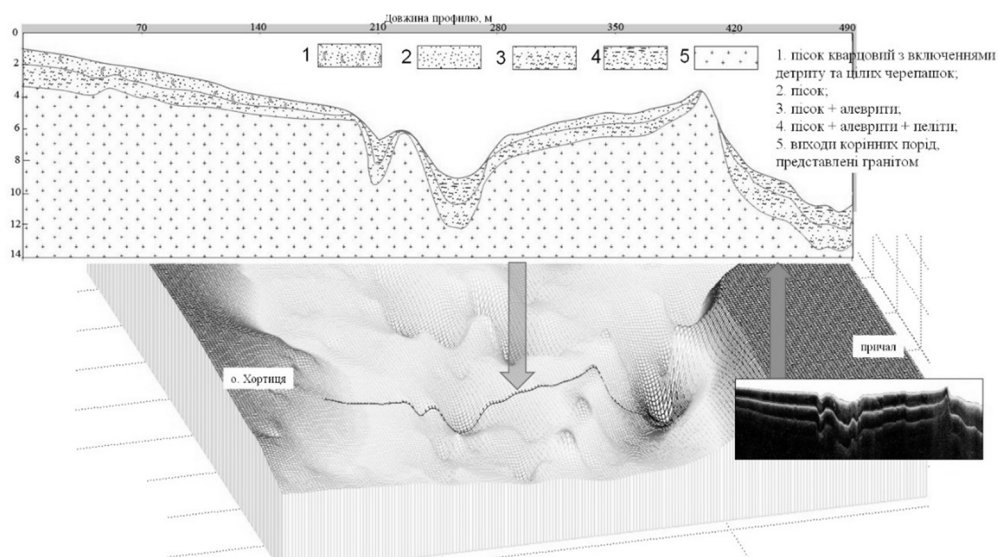


Рис. 5. Стратифікація донних відкладів за даними обробки профілограм

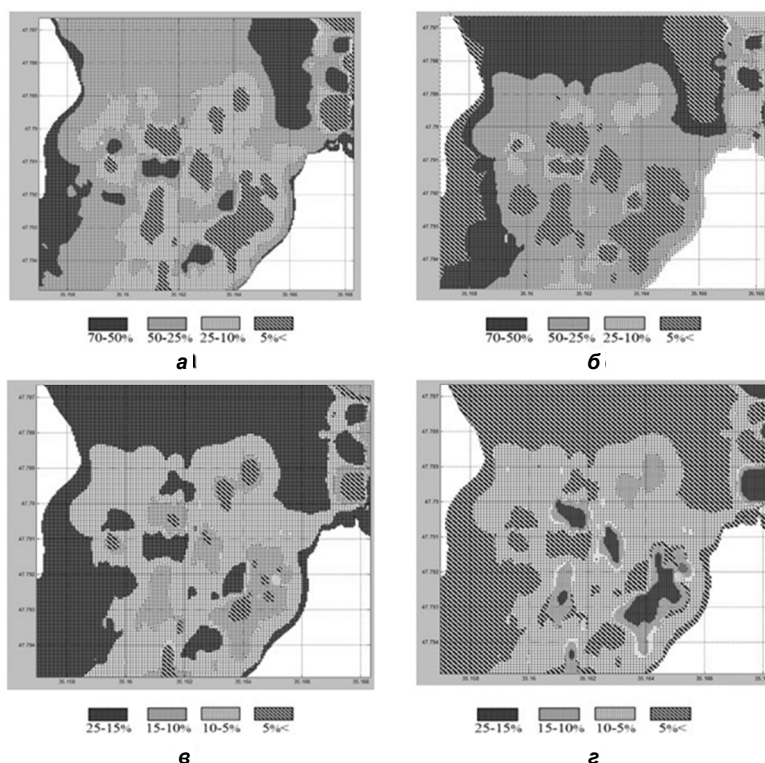


Рис. 6. Схеми поширення гранулометричних фракцій поверхневих донних осадків у межах досліджуваного полігону р. Дніпро в межах м. Запоріжжя:

а – крупно-середньопіщаний матеріал (1,0–0,5 мм); б – дрібно-піщаний матеріал (0,25–0,1 мм); в – матеріал алевритової розмірності (0,1–0,01 мм); з – матеріал пелітової розмірності (менше 0,01 мм)

У разі віддалення від цих ділянок і зі збільшенням глибини кількість матеріалу порівняно швидко зменшується. Розподіл дрібно-піщаного матеріалу характерний для зон, де рух водних мас найактивніше впливає на винесення більш дрібних частинок, але недостатній для сортування піщаних фракцій. Дрібно-піщаний матеріал характерний також для підводного берегового схилу. У бік берегової лінії кількість зерен розмірністю 0,25–0,1 мм поступово зменшується. Тут діапазон вмісту заліза у верхньому шарі

відкладів значно збільшується, але середні показники свідчать, що його відсоток становить 8–9 пунктів у загальному розподілі макрокомпонентів.

Високий вміст алевритового матеріалу в межах полігону характерний для глибоководних частин водойми, а також для мілководних заток, захищених від сильного хвилювання. Загалом алевритовий матеріал представлений досить широко, проте його вміст зрідка перевищує 10 %, зводячи гранулометричну фракцію 0,1–0,01 мм до

ролі домішки. Як і для дрібнопіщаних відкладів, вміст заліза в осадах, збагачених алевритовою складовою, коливаються в широкому діапазоні, але середні показники також сягають до 9–10 % загального вмісту.

Пелітовий матеріал трапляється в поверхневих осадах полігону зазвичай у невеликих кількостях, вміст його понад 20 % властивий невеликим плямам, приуроченим до ділянок з пасивною гідродинамікою. Водночас геохімічні дослідження відібраних проб з максимальними концентраціями гранулометричної фракції, меншої за 0,001 мм, свідчать про максимальні концентрації заліза, що можуть перевищувати 13 % від речовинного складу проб.

Виявлений тісний зв'язок між гранулометричним складом, геоакустичними параметрами та питомою щільністю дає змогу використовувати коефіцієнти відбиття як індикатор змін літологічного складу донних осадків під час дистанційних досліджень. Крім того, закономірності розподілу загальної кількості заліза в різних типах донних відкладів і достатньо чітка прив'язка їх до пелітової складової визначають можливість прогнозування вмісту металу для різних літологічних класів поверхневого шару донних осадків (Гончар і др., 2012).

Фактично результати кореляційного аналізу для досліджуваної території виявили відносно стійкий зв'язок між дистанційно визначеним ділянками з максимальним вмістом пелітової, а також піщаної складової поверхневих осадків. За обробкою результатів гідроакустичної дистанційної та геохімічної контактної зйомок, що проводилися протягом двох сезонів, показник кореляції між розподілом зон з максимальним вмістом дрібнодисперсної складової поверхневих осадків та підвищеними концентраціями заліза сягають значення 0,68, максимальним вмістом псамітової фракції та мінімальним концентраціями Fe – 0,62 відповідно.

Безумовно, існують певні зауваження та низка невизначеностей щодо застосування таких методик для інших ділянок акваторій, пов'язаних із природними та техногенними особливостями їхнього стану, де розподіл концентрацій металів визначається іншими факторами впливу. Зокрема, у межах Запоріжжя окремі ділянки дна Дніпра, представлені відкладами піщаної розмірності, збагачені залізом за рахунок прямого привнесення продуктів викидів різних циклів металургійного виробництва алевритової та псамітової розмірності. Але розподіл таких зон обмежений фізичними закономірностями прямого атмосферного чи водного надходження частинок руди або залізовмісних сферул піщаної розмірності та їх акумуляції в межах таких ореолів виносу.

Іншим суттєвим обмеженням є те, що визначення концентрацій заліза за типом поверхневого шару донних відкладів можливе лише за припущення, що територія досліджень є фоновою, і фактори розподілу металу для всіх її ділянок визначаються суто природними закономірностями формування седиментаційних потоків.

Проте, незважаючи на зазначені обмеження, проведені дослідження дали змогу попередньо обґрунтувати можливість залучення до польових робіт геоекологічного спрямування геофізичну складову. У разі великих обсягів картування розподілу металовмісної складової поверхневого шару донних відкладів такі дистанційні визначення можуть значно скоротити час досліджень та їхню собівартість. Водночас обов'язковою умовою буде збереження оптимального мінімуму контактних контрольних досліджень за визначеними геофізичними методами картами розподілу поверхневих типів донних осадків.

Варто відзначити, що завдяки проведеним дослідженням у межах експериментального полігону виявлено таку закономірність: розподіл більшості важких металів у

складі річкової зависі та поверхневому шарі донних відкладів визначає значну величину коефіцієнта кореляції для певних їх груп та заліза (зокрема, для групи мідь-свинець-залізо він перевищує величину 0,8). Це відкриває потенційну можливість дистанційного визначення вмісту низки важких металів у поверхневих осадах.

Висновки

Проведені дослідження засвідчили, що комплексний підхід на основі аналізу дистанційних і контактних методів відкриває нові можливості ефективного та маловитратного моніторингу стану донних відкладів, дає змогу найбільш повно використовувати всю наявну інформацію геохімічного та геофізичного характеру. Завдяки використанню технологій гідроакустичних досліджень можна отримувати відомості про стан досліджуваного середовища на великих площах, значно скоротити час на проведення робіт, зменшити їх собівартість та підвищити ефективність.

Основні закономірності поширення літологічних типів донних відкладів добре відомі – ділянки, де відбувається активне накопичення пелітового матеріалу, відповідають районам мінімальної гідродинамічної активності, а також у пониженнях рельєфу, навіть у межах фарватеру – вони працюють як пастки, створюючи умови для відкладання дрібнодисперсної завислої речовини. Водночас геохімічні дослідження зразків верхнього шару донних відкладів (0,5–1 см), відібраних за визначеною мережею, вказують на стійку тенденцію до збільшення вмісту забруднювачів, зокрема заліза, мангану та деяких важких металів у ряді піщаних відкладів – від замулених та дрібнодисперсних пісків до алеврито-пелітових та пелітових відкладів. Останнє, як було зазначено вище, може бути пов'язане із сорбційною ємністю різних гранулометричних і мінералогічних типів відкладів, що визначають різні типи донних осадків.

Проведені дослідження дали змогу окреслити та попередньо обґрунтувати новий напрям польових робіт геоекологічного спрямування, що поєднує в собі геофізичні та геохімічні методи досліджень акваторії Дніпра, контактну та дистанційну зйомку верхнього шару донних відкладів. Водночас сучасність і перспективність таких досліджень визначається можливістю проведення дистанційної оцінки екологічних характеристик верхнього шару донних відкладів з використанням геофізичного комплексу, основними елементами якого є гідролокатор бокового огляду, ехолот та система глобального позиціонування. Визначення фізико-механічних та акустичних властивостей дна акваторій за методикою автоматизованої дистанційної профільної ґрунтової зйомки морського дна за відбитим сигналом гідроакустичного профілографа з оцінкою ймовірності класифікації дозволяє одержувати інформацію щодо літологічної складової поверхневих донних відкладів. У той самий час прив'язка розподілу концентрацій забруднювачів до реперних літологічних класів донних осадків відкриває можливість проводити геохімічну зйомку екологічного стану поверхневих донних відкладів за допомогою дистанційних гідроакустичних методів. При цьому головною потенційною вигодою є суттєве зменшення витрат на виконання робіт, а також підвищення їх продуктивності.

Список використаних джерел

- Безруков, П.Л., Лисицын, А.П. (1960). Классификация осадков современных морских водоемов. *Труды Института океанологии*, 32, 3–14.
- Гончар, А.И., Голод, О.С., Федосеев, С.Г., Шльчак, Л.И., Шундель, А.И. (2012). Вероятностная оценка послойного определения литологических свойств донных отложений в профилограммах. *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики*, 265–268.
- Гончар, А.И., Гончар, Ю.А., Голод, О.С., Федосеев, С.Г. (2014). Методология дистанционной профильной ґрунтової съемки для

определения типов донных отложений. *Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики*, 483–486.

Гончар, А.І., Федосеєнков, С.Г. (2016). Гідрогеоакустичний комплекс як інструмент вивчення взаємозв'язку процесів у водній товщі та донних відкладеннях. *Геодинаміка*, 21(2), 101–108. <https://doi.org/10.23939/jgd2016.02.101>.

Гончар, А.І., Федосеєнков, С.Г. (2017). Сучасні комп'ютерні методи обробки і візуалізації гідроакустичної інформації. *Геоінформатика*, 61(1), 19–25.

Смельянов, В.О., Наседкін, Є.І., Федосеєнков, С.Г. (2019). Щодо перспектив досліджень екологічного стану геолого-екологічних систем донних відкладів відкритих водойм геофізичними методами. *Конференція "Здобутки і перспективи розвитку геологічної науки в Україні"*, 14–16 травня 2019, Київ, Україна.

Митропольский, А.Ю., Безбородов, А.А., Овсяный, Е.И. (1982). Геохимия Черного моря. *Научная думка*.

Митропольський, О.Ю., Наседкін, Є.І., Іванова, Г.М., Кураєва, І.В., Войтюк, Ю.Ю., Федосеєнков, С.Г. (2017). Моніторинг стану річкових відкладів у межах індустріальних осередків (на прикладі м. Запоріжжя). *Мінералогічний журнал*, 39(3), 75–84. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.03.075>.

Anderson, M., Pacheco, P. (2011). Characterization of bottom sediments in lakes using hydroacoustic methods and comparison with laboratory measurements. *Water Research*, 45(15), 4399–4408. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.029>.

Mytropolskyi, O.Yu., Nasiedkin, Ye.I., Fedoseienkov, S.H., Ivanova, H.M., Dovbysh, S.M. (2016). Restoration and adaptation of the sedimentation process monitoring project at the "Zaporizhzhia" landfill. *Geology and mineral resources of the world ocean*, 3, 89–94.

Ostrovsky, I., Tegowski, J. (2010). Hydroacoustic analysis of spatial and temporal variability of bottom sediment characteristics in Lake Kinneret in relation to water level fluctuation. *Geo-Marine Letters*, 30, 261–269. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0180-4>.

Papenmeier, S., Darr, A., Feldens, P., Michaelis, R. (2020). Hydroacoustic Mapping of Geogenic Hard Substrates: Challenges and Review of German Approaches. *Geosciences*, 100. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030100>.

References

Anderson, M., Pacheco, P. (2011). Characterization of bottom sediments in lakes using hydroacoustic methods and comparison with laboratory measurements. *Water Research*, 45(15), 4399–4408. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.05.029>.

Bezrukov, P.L., Lisitsyn, A.P. (1960). Classification of sediments of modern marine reservoirs. *Proceedings of the Institute of Oceanology*, 32, 3–14 [in Russian].

Honchar, A.I., Fedoseienkov, S.H. (2016). Geo- and hydro-acoustic complex as a study of interconnection between processes in waters and bottom sediments. *Geodynamics*, 21(2), 101–108. <https://doi.org/10.23939/jgd2016.02.101> [in Ukrainian].

Honchar, A.I., Fedoseienkov, S.H. (2017). Methods of modern computer processing and visualization of sonar information. *Geoinformatics*, 61(1), 19–25 [in Ukrainian].

Honchar, A.I., Holod, O.S., Fedoseienkov, S.H., Shlychek, L.I., Shundel, A.I. (2012). Probabilistic assessment of layer-by-layer determination of lithological properties of bottom sediments in profilograms. *Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics*, 265–268 [in Russian].

Honchar, A.I., Honchar, Yu.A., Holod, O.S., Fedoseienkov, S.H. (2014). Methodology of remote profile ground survey for determination of bottom sediments types. *Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics*, 483–486 [in Russian].

Mytropolskyi, A.Yu., Bezborodov, A.A., Ovsyanyi, Ye.I. (1982). The Black Sea Geochemistry. *Naukova Dumka* [in Russian].

Mytropolskyi, O.Yu., Nasiedkin, Ye.I., Fedoseienkov, S.H., Ivanova, H.M., Dovbysh, S.M. (2016). Restoration and adaptation of the sedimentation process monitoring project at the "Zaporizhzhia" landfill. *Geology and mineral resources of the world ocean*, 3, 89–94.

Mytropolskyi, O.Yu., Nasiedkin Ye.I., Ivanova H.M., Kuraieva, I.V., Voitiuk, Yu.Yu., Fedoseienkov, S.H. (2017). Monitoring of the state of river sediments within industrial centres (on the example of Zaporizhzhia city). *Mineralogical Journal*, 39(3), 75–84. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.39.03.075> [in Ukrainian].

Ostrovsky, I., Tegowski, J. (2010). Hydroacoustic analysis of spatial and temporal variability of bottom sediment characteristics in Lake Kinneret in relation to water level fluctuation. *Geo-Marine Letters*, 30, 261–269. <https://doi.org/10.1007/s00367-009-0180-4>.

Papenmeier, S., Darr, A., Feldens, P., Michaelis, R. (2020). Hydroacoustic Mapping of Geogenic Hard Substrates: Challenges and Review of German Approaches. *Geosciences*, 100. <https://doi.org/10.3390/geosciences10030100>.

Yemelianov, V.O., Nasiedkin Ye.I., Fedoseienkov, S.H. (2019). Regarding the prospects of researching the ecological state of geological and ecological systems of bottom sediments of open water bodies by geophysical methods. *Conference "Achievements and Development of the Geological Sciences in Ukraine"*, 2019 May 14–16, Kyiv, Ukraine [in Ukrainian].

Отримано редакцію журналу / Received: 14.02.23

Прорецензовано / Revised: 13.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Volodymyr YEMELIANOV¹, DSc (Geol. & Mineral.), Prof., Corresponding member of NAS of Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-8972-0754

e-mail: eva@nas.gov.ua

Yevhen NASIEDKIN², PhD (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0003-2633-9291

e-mail: nasedevg@ukr.net;

Serhii FEDOSEIENKOV³, PhD (Geol.)

e-mail: fedoseienkov@nas.gov.ua

Tetiana KOSHLIAKOVA⁴, PhD (Geol.), Senior Researcher

ORCID ID: 0000-0001-8551-3531

e-mail: tatianakoshliakova@gmail.com

¹State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine

²Institute of geological sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

⁴M. P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF HYDROACOUSTIC METHODS IN GEOCHEMICAL RESEARCH OF POLLUTANTS DISTRIBUTION IN THE SURFACE LAYER OF BOTTOM SEDIMENTS

The article presents the results obtained during the long-term field studies of the characteristics of the sedimentary matter metal-containing component distribution within the territories of industrial cities, in particular, Zaporizhzhia city. Based on field contact and remote studies, one of the aspects of the problem was studied, namely the peculiarities of iron concentrations distribution in the surface layer of bottom sediments of the Dnipro river. Key practical approaches to the application of a new complex method of field observations are outlined, which combine the possibilities of express planar surveying with the determination of geochemical characteristics of river sediments. The methodology of combining contact geochemical studies of iron distribution in surface bottom sediments with the performance of a side view of a remote route survey using sonar is substantiated. Herewith, the possibility of determining the lithological differences of the surface layer of bottom sediments under the conditions of determining the average concentrations of iron for the main material types of sediments is assumed. The results of two-year research based on the data of fieldwork revealed promising perspectives for the development of such a complex of observations in the case of systematization of the direction, additional testing of the technological component in various test areas of the water area, as well as the development of an appropriate methodological foundation.

Keywords: environmental geology, bottom sediments, remote route survey, hydroacoustic methods, contact geochemical studies.

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.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.3 (519.21)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.11>

Zoia VYZHVA, DSc (Phys. & Math.), Prof.

e-mail: zoya_vyzhva@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Vsevolod DEMIDOV, PhD (Phys. & Math.), Assoc. Prof.

e-mail: fondad@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Andrii VYZHVA, PhD (Phys. & Math.), Senior Researcher

e-mail: motomustanger@ukr.net

SE "Naykanafto-gaz", Kyiv, Ukraine

THE STATISTICAL SIMULATION OF RANDOM FIELDS WITH THE GAUSSIAN TYPE CORRELATION FUNCTION BY THE INVESTIGATION OF THE MAGNETOMETRY DATA*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, ст. дослідником О.І. Меньшовим)*

In the article, universal methods of statistical modeling (Monte Carlo methods) of geophysical data using the Gaussian correlation function have been developed, which make it possible to solve the problems of generating adequate realizations of random fields on a grid in three-dimensional space of required regularity and detail. Since in geophysics, most of the results of object research are presented in digital form, the accuracy of which depends on various random influences, the problem of the condition of the maps arises in the case when the data cannot be obtained with the specified detail in some observation areas. It is proposed to apply statistical simulation of random fields methods, to solve the problems of conditional maps, supplement the required detail of research results with additional data, to achieve the required accuracy of observations, and other similar problems in geophysics. An algorithm for numerical modeling of realizations of homogeneous isotropic random fields in three-dimensional space with a Gaussian correlation function is formulated on the basis of the theorem on estimation of the mean-square approximation of such random fields by the partial sum of the "spectral decomposition" series. Using the example of data from aeromagnetic surveying in the area of the Ovruch depression, the proposed algorithm for statistical modeling of random fields is implemented in solving the problems of map fitness by supplementing the data with simulated adequate implementations to the required level of detail. When analyzing data by profiles, they are divided into deterministic (trend) and random components. The trend is proposed to approximate by cubic splines and the homogeneous isotropic random component is proposed to modeling on the basis "spectral decomposition" of random fields on 3-D space in the Ovruch depression. According to the algorithm, authors received random component implementations on the study area with twice detail for each profile. When checking their adequacy, authors made the conclusions that the relevant random components histogram has Gaussian distribution. The built variogram of these implementations has the best approximation by theoretical variogram which is connected to the Gaussian type correlation function. As a result of superimposing the simulated array of the random component on the spline approximation of the real data, a more detailed implementation was obtained for the data of geomagnetic observations in the selected area. A comparative analysis of the results of modeling realizations random fields with the Gaussian correlation function with other correlation functions is carried out. Therefore, the method of statistical modeling of realizations of random fields in three-dimensional space with the Gaussian correlation function makes it possible to supplement the results of measurements of the full magnetic field intensity vector with data with a given detail as much as possible.

Keywords: Statistical simulation, spectral decomposition, a Gaussian correlation function, conditional maps.

Background

The tasks of random fields statistical simulation arise solving the actual geophysics problems. The statistical simulation of random fields method is used to solve the problems of conditional maps, supplement the required detail of research results with additional data, to achieve the required accuracy of observations, and other. A special care is necessary for reduction of calculations, amount of which rapidly grow together with the dimension of the argument of the random field in this case. Many different approaches related to the solving of problems of random fields statistical simulation were described in a lot of papers, for example (Chiles, Delfiner, 2012; Vyzhva, 2011, 2021; Vyzhva et al., 2020a, 2020b, 2020c; Tolosana-Delgado, Mueller, 2021; Wackernagel, 2003).

It is proposed in the papers (Vyzhva et al., 2012, 2010; Vyzhva, Z., Vyzhva, A., 2016) to apply methods of statistical simulation of realizations of random fields on the plane (2-D space), to solve the problems of conditional maps, adding of data to achieve the necessary precision, and other similar problems in geophysics. Example for modeling is magnetometry data in those works. But the magnetometry data was investigated on 3-D space. It is divided into deterministic (trend) and random components for 3-D data analysis. The trend is proposed to

approximate by cubic splines. The stationary random component of magnetometry data to modeling on the basis of spectral decomposition" of 3-D random fields with the Gaussian correlation function is proposed in this paper. The algorithm of statistical simulation of homogeneous isotropic random fields with this type correlation function on the 3-D space using approximations theorems is considered. Applying the above method makes it possible to supplement the missing magnetometry data in the study area with greater accuracy than in the paper (Vyzhva et al., 2018a) with the Bessel type correlation function.

There has been an introduced random field statistical simulation based on spectral representation in order to enhance map accuracy by the example of aeromagnetic survey data in the Ovruch depression.

Denote, that methods of statistical simulation of random field on 3-D space based on representation of it by stochastic sums was considered in papers example (Chiles, Delfiner, 2012; Vyzhva, 2003, 2011; Vyzhva et al., 2013, 2018a) and other.

The spectral representation of homogeneous isotropic random fields on 3-D space.

A real-valued homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ authors consider on 3-D space (r, θ, φ – spherical coordinates). On 3-D Euclidean space R^3 , square-mean

homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$, which is continuous real-valued admit the spectral decomposition by spherical harmonics this result was obtained earlier (Yadrenko, 1983; Vyzhva, 2003, 2011). This "spectral decomposition" is the sum:

$$\xi(r, \theta, \varphi) = c_3 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=-m}^m \zeta_m^l(r) S_m^l(\theta, \varphi), \quad (1)$$

where the constant $c_3 = \sqrt{2}\pi$, random processes $\zeta_m^l(r)$ are integrals:

$$\zeta_m^l(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)}{(\lambda r)^{\frac{1}{2}}} Z_m^l(d\lambda), \quad (2)$$

where $J_{m+\frac{1}{2}}(\lambda r)$ is the Bessel function of the first kind of order $m + \frac{1}{2}$ and $\{Z_m^l(\cdot)\}$ are the sequence of orthogonal random measures on Borel subsets from the interval $[0, +\infty)$, i. e.

$$EZ_m^l(S_1) Z_{m'}^{l'}(S_2) = \delta_l^{l'} \delta_m^{m'} \Phi(S_1 \cap S_2),$$

for any Borel subsets S_1 and S_2 , here $\delta_m^{m'}$ is Kronecker symbol, $\Phi(\lambda)$ is the bounded nondecreasing function (so-called "spectral function") and the spherical harmonics $S_m^l(x)$ are the product of functions:

$$S_m^l(\theta, \varphi) = \tilde{c}_{m,l} P_m^l(\cos \theta) e^{il\varphi},$$

where $P_m^l(x)$ are associated Legendre functions of degree m ,

$$\tilde{c}_{m,l} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\nu_l}{\pi} \frac{(m-l)!}{(m+l)!}} (2m+1), \quad (3)$$

$$\nu_l = \begin{cases} 1, & l \neq 0, \\ 2, & l = 0. \end{cases}$$

On 3-D area authors are considering the correlation function $B(\rho)$ of the homogeneous isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ which depends on distance ρ between the vectors

$$x, y \in \mathbb{R}^3: x = (r_1, \theta_1, \varphi_1), \quad y = (r_2, \theta_2, \varphi_2),$$

$$\rho = r\sqrt{2(1 - \cos \psi)} = r \sin(\psi/2),$$

where $\cos \psi$ is angular distance between vectors $x, y \in \mathbb{R}^3$:

$$\cos \psi = \cos \theta_1 \cos \theta_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2).$$

It may be presented (Vyzhva, 2003) as an integral:

$$B(\rho) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\infty} \frac{J_{\frac{3}{2}}(\lambda \rho)}{\sqrt{\lambda \rho}} d\Phi(\lambda), \quad (4)$$

where $J_{\frac{3}{2}}(z)$ is the Bessel function of the first kind of order $1/2$, $\Phi(\lambda)$ is "spectral function", ρ is distance between the points $x, y \in \mathbb{R}^3: x = (r_1, \theta_1, \varphi_1), y = (r_2, \theta_2, \varphi_2)$.

Authors obtain the variances of random processes $\zeta_m^l(r)$ as:

$$b_m(r) = \text{Var } \zeta_m^l(r) = E[\zeta_m^l(r)]^2, \quad l = 1, 2, \dots, h(m, 3).$$

Then authors have the formulas for coefficients $b_m(r)$ as an integral:

$$b_m(r) = \int_0^{\infty} \frac{J_{m+\frac{1}{2}}^2(\lambda r)}{\lambda r} \Phi(d\lambda), \quad m = 0, 1, \dots \quad (5)$$

$$\xi_N(r, \theta, \varphi) = \sum_{m=0}^N \sum_{l=0}^m c_{ml} P_m^l(\cos \theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi], \quad N \in \mathbb{N}. \quad (11)$$

The mean square approximation of random field $\xi(\rho, \theta, \varphi)$ by model (11) is the sum:

$$M|\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)|^2 \leq \pi \int_0^{\infty} \left\{ \sum_{m=N+1}^{\infty} \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{J_{m+1/2}^2(\lambda r)}{\lambda r} \right\} d\Phi(\lambda) = \pi/2 \sum_{m=N+1}^{\infty} (2m+1) \int_0^{\infty} \frac{J_{m+1/2}^2(\lambda r)}{\lambda r} d\Phi(\lambda). \quad (12)$$

$$E|\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)|^2 \leq 2\pi \sum_{m=N+1}^{\infty} \left(m + \frac{1}{2}\right) b_m(r)$$

Authors need this mean square approximation in the convenient form for the constructing statistical simulation of realizations of homogeneous isotropic random fields on 3-D space algorithm. The estimates of this mean square approximation were received in the following theorems.

Authors denote the integrals as:

$$\mu_k = \int_0^{+\infty} \lambda^k \Phi(d\lambda), \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

Theorem 2. Let a mean square continuous realvalued homogeneous isotropic random field $\xi(\rho, \theta, \varphi)$ on 3-D space

Authors will call the coefficients $b_m(r)$ (which depends on spherical radius r) as

"spectral coefficients". These coefficients are defined by the correlation function $B(\rho)$ of the homogeneous isotropic random field in the way:

$$b_m(r) = 2\pi \int_0^{\pi} B(\rho) P_m(\cos \psi) \sin \psi d\psi. \quad (6)$$

The variance of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ authors obtain by this as the sum:

$$E\xi^2(r, \theta, \varphi) = \text{Var } \xi(r, \theta, \varphi) = \pi/2 \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) b_m(r). \quad (7)$$

However, is used the "spectral decomposition" of homogeneous isotropic random field on 3-D space by solution statistical simulation problems of those random field's realizations and in this sum figurate real-valued random processes, which are real-valued random variables by fixed spherical radius r . Let adduce that decomposition in the Theorem 1. The following statement is true.

Theorem 1. Let $\xi(r, \theta, \varphi)$ is a mean square continuous realvalued homogeneous isotropic random field in 3-D space with zero mean. Then this random field admits (Vyzhva, 2011) the following "spectral decomposition":

$$\xi(r, \theta, \varphi) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{l=0}^m \tilde{c}_{m,l} P_m^l(\cos \theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi] \quad (8)$$

where $P_m^l(x)$ are associated Legendre functions of degree m , $\{\zeta_{m,k}^l(r)\}$, $k = 1, 2$ are random values sequences of random processes $\zeta_m^l(r)$ as an integral (2), such that satisfying the following conditions:

$$M\zeta_{m,k}^l(r) = 0; \quad (9)$$

$$M\zeta_{m,k}^l(r) \zeta_{m',k'}^{l'}(r) = \delta_l^{l'} \delta_m^{m'} \delta_k^{k'} b_m(r). \quad (10)$$

In (10) δ_p^p is Kronecker symbol, $\tilde{c}_{m,l}$ are constants sequences, which calculated by the formula (3), and $b_m(r)$ are the "spectral coefficients" (5).

Authors note, that the statement of Theorem 1 was proved in a number of works (Yadrenko, 1983; Vyzhva, 2003).

Remark. If authors consider this theorem for the homogeneous isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ with Gaussian distribution, then random values sequences $\{\zeta_{m,k}^l(r)\}$ in decomposition (8) are sequences of independent random values (by fixed spherical radius r) with Gaussian distribution.

The model, approximation theorems and procedure of the statistical simulation of homogeneous isotropic random fields on 3-D space.

The statistical simulation of realizations of homogeneous isotropic random fields on 3-D space on the basis of "spectral decomposition" (8) is considered.

The approximation model of homogeneous isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ is built using series (8) which consists of partial sums, and looks like:

$$\xi_N(r, \theta, \varphi) = \sum_{m=0}^N \sum_{l=0}^m c_{ml} P_m^l(\cos \theta) [\zeta_{m,1}^l(r) \cos l\varphi + \zeta_{m,2}^l(r) \sin l\varphi], \quad N \in \mathbb{N}. \quad (11)$$

The mean square approximation of random field $\xi(\rho, \theta, \varphi)$ by model (11) is the sum:

$$M|\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)|^2 \leq \pi \int_0^{\infty} \left\{ \sum_{m=N+1}^{\infty} \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{J_{m+1/2}^2(\lambda r)}{\lambda r} \right\} d\Phi(\lambda) = \pi/2 \sum_{m=N+1}^{\infty} (2m+1) \int_0^{\infty} \frac{J_{m+1/2}^2(\lambda r)}{\lambda r} d\Phi(\lambda). \quad (12)$$

$$E|\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)|^2 \leq 2\pi \sum_{m=N+1}^{\infty} \left(m + \frac{1}{2}\right) b_m(r)$$

with zero mean. If $\mu_3 < +\infty$, then the mean square approximation of this random field by model (11) is such expression:

$$M|\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)|^2 \leq \frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3, \quad (14)$$

$$\text{where } \mu_3 = \int_0^{\infty} \lambda^3 \Phi(d\lambda). \quad (15)$$

Authors note, that the statement of Theorem 2 was proved in the article (Vyzhva et al., 2018a).

Further authors consider another estimate of the mean square approximation of homogeneous isotropic random

fields on 3-D space, where the "spectral function" $\Phi(\lambda)$ is satisfy the following condition:

$$\mu_{2N+2} = \int_0^{+\infty} \lambda^{2N+2} \Phi(d\lambda) < +\infty.$$

Theorem 3. Let a mean square continuous realvalued homogeneous isotropic random field on 3-D space with zero mean. If $\mu_{2N+2} < +\infty$, then the mean square approximation of this random field by model $\xi_N(r, \theta, \varphi)$ (11) is such inequality:

$$M[\xi(r, \theta, \varphi) - \xi_N(r, \theta, \varphi)]^2 \leq \frac{2^{N+2} r^{2N+2} (N+1)!}{(2N+3)!} \mu_{2N+2}. \quad (16)$$

where

$$\mu_{2N+2} = \int_0^{+\infty} \lambda^{2N+2} \Phi(d\lambda). \quad (17)$$

Authors note, that the statement of Theorem 3 was proved in the article (Vyzhva et al., 2018a).

The algorithm of the statistical simulation of homogeneous isotropic random fields realizations on 3-D space may be formulated by using the approximation theorems 2 and 3, which authors were considered before. Now authors formulate the procedure of such kind, which based on the "spectral decomposition" of realvalued homogeneous isotropic random field on 3-D space (Theorem 1). For the first time this type algorithm is called "spectral coefficients algorithm" by Vyzhva Z.O. in (Vyzhva, Fedorenko, 2013a).

Below authors describe the procedure for the statistical simulation of Gaussian homogeneous isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ realizations on 3-D space, which was constructed on the basis of model (11) and estimates (14) and (16).

Algorithm

1. The natural number N , which is summation limit, is chosen according to necessary accuracy $\varepsilon > 0$ approximation of the model (11) by means of one of the inequalities (14) or (16). Those conditions for N , which must be fulfilled, are listed below:

$$\frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3 \leq \varepsilon,$$

where μ_3 is (15), or

$$\frac{2^{N+2} r^{2N+2} (N+1)!}{(2N+3)!} \mu_{2N+2} \leq \varepsilon,$$

where μ_{2N+2} is (17).

2. The spectral coefficients $b_m(r)$, $m = 0, 1, \dots, N$ are calculated by formula (6) as the integral (r – fixed spherical radius).

3. Let's simulate the sequences of independent Gaussian random variables (r – fixed spherical radius):

$$\{\zeta_{m,k}^l(r)\}, \quad k = 1, 2; \quad m = 0, 1, 2, \dots, N; \quad l = 1, \dots, m;$$

that satisfy the conditions (9) and (10).

4. Let's calculate the realization of the stochastic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ by formula for model (11) in given point $(r_i, \theta_j, \varphi_p)$, $i = 1, 2, \dots, I$; $j = 1, 2, \dots, G$; $p = 1, 2, \dots, P$ on 3-D space by means of substituting in it values from the previous items 1, 2 and 3, numbers N and sequences of Gaussian random variables.

5. Check whether the realization of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ generated in step 3 fits the data by testing the corresponding statistical characteristics (distribution, correlation function $B(\rho)$).

The statistical simulation of the Gaussian homogeneous isotropic random fields realizations on 3-D space can be done by means of this algorithm. By this authors must have information about correlation function and distribution of this field. If the random field have another type of distribution (not Gaussian), then authors simulate the sequences of independent random variables in step 2 with corresponding distribution.

The statistical simulation methods of random fields by the aircraft magnetometry data on 3-D space.

The map accuracy problem occurs in geophysical research, when the data cannot be obtained with a given detail in some areas of investigation. The statistical modeling methods of random fields realizations are recommended (Vyzhva, 2003, 2011; Vyzhva et al., 2010, 2012, 2018a; Vyzhva, Fedorenko, 2013a, 2013b; Vyzhva Z., Vyzhva A., 2016) to supplement data missing in such cases.

In the presented work, the data of aeromagnetic surveys for the Ovruch depression were studied, in order to improve the accuracy of maps, on which the authors carried out statistical modeling of random fields based on the "spectral representation". The object of geophysical research was the data of aeromagnetic survey of 1:10,000 scale on the area of size $2500 \times 2500 \text{ m}^2$, that was conducted during period 1996–2002.

The full magnetic field intensity vector $\mathbf{T}$ was investigated (see the map on fig. 1). The work was carried out on 25 profiles with a distance of 100 meters between them (X from 0 to 2500 m and Y from 0 to 2500 m) and authors have for statistical analyses 625 points of investigation.

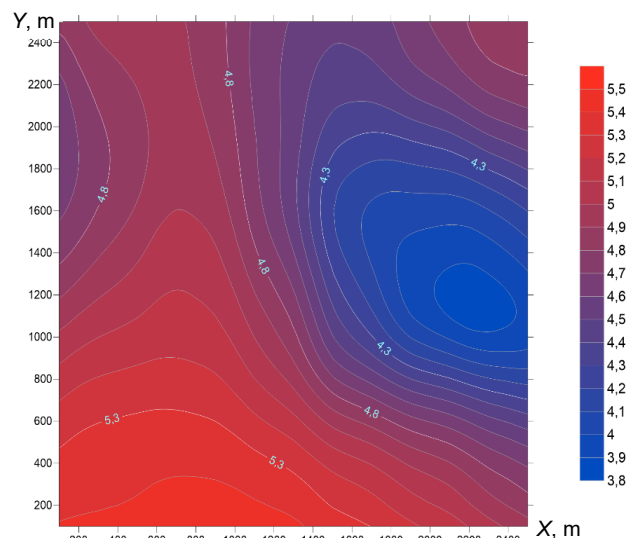


Fig. 1. The map of aeromagnetic survey data ΔT_{an} in the Ovruch depression (built in Surfer)

Further authors translate the Cartesian coordinates (x, y, z) of the three-dimensional space, which are tied to the points of measurement, into spherical coordinates (r, θ, φ) for using our random fields statistical modeling method.

Authors did the data analysis, while constructing data graphs for input data of each profile and authors think that it is expedient to distinguish deterministic and random components. The deterministic function (trend $f_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 1, 2, \dots, 25$ – profile numbers) can be selected in different ways. One determination method was considered in (Vyzhva et al., 2012). But there is a more accurate way to select deterministic component – approximation by cubic spline data (Vyzhva et al., 2010, 2018a; Vyzhva, Z., Vyzhva A., 2016). The difference between spline approximation of data and input data is a random process that is frequently stationary for most profiles of investigation.

Authors use the notation of the input data on the profile as a random field $\eta_i(r, \theta, \varphi)$, where i is profile numbers. The stationary random component $\xi_i(r, \theta, \varphi)$ (random fields) for input data and trend $f_i(r, \theta, \varphi)$ as determined cubic spline function were selected for each profile ($i = 1, 2, \dots, 25$). Thus, the input data on profiles is a random field in the form of a sum:

$$\eta_i(r, \theta, \varphi) = f_i(r, \theta, \varphi) + \xi_i(r, \theta, \varphi), \quad i = 7, \dots, 20. \quad (18)$$

Now authors introduce the notation of spline approximation for input data in the profile number i as $S_i^{(1)}(r, \theta, \varphi)$, built by means of the MathCad software for PRi (profile № i) data. Parameters defined by the data were determined for such spline in the profile.

Based on observations (values) of random component $\xi_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 7, \dots, 20$ in all 13 profiles authors created array that frequently represents isotropic random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ on 3-D space with zero mathematical expectation and approximately Gaussian distribution (fig. 2).

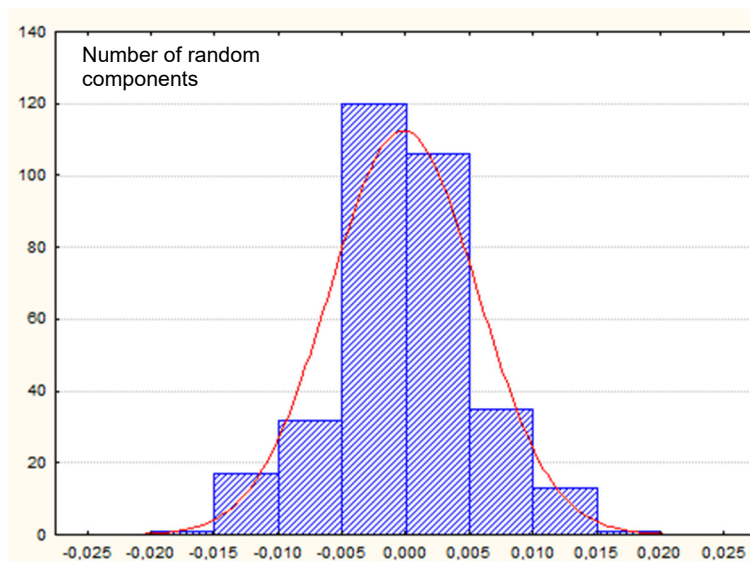


Fig. 2. Histogram for observed values of random component for input aeromagnetic survey data in all 13 profiles (for PR7-PR20) in the Ovruch depression. The red line indicates the density of the Gaussian distribution

By availability of such properties of input data, authors can apply the method of statistical simulation of random fields on 3-D space based on their "spectral decomposition" (8) for aeromagnetic survey data, which allows finding the perfect image of entire observations field for their certain implementation values. So, authors generate additional random component data in the points from investigation areas on 3-D space where geomagnetic measurements were not carried out, for example, with double precision intervals of 50 compare to 100 meters or between profiles. Authors can impose this modeling data on the spline curve trend $S_i^{(1)}(r, \theta, \varphi)$, $i = 7, \dots, 20$ for each profile and obtain more detailed aeromagnetic survey data in the field of observations. This method differs from the traditional interpolation method, which uses the average of neighboring measured points for the calculation point. Our method takes into account the statistical distribution of airborne magnetic survey data and the correlation between data points. Using the above method makes it possible to supplement the missing data in the study area with greater accuracy than in (Vyzhva, Fedorenko, 2013b). (the mean square deviation is 0, 225) and then in (Vyzhva et al., 2018a) with Bessel type correlation function (the mean square deviation is 0, 195), taking into account their statistical nature.

The built variogram of these implementations $\xi_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 7, \dots, 20$ has the best approximation (the mean square deviation is 0,011) by theoretical variogram which is connected to the Gaussian type correlation function (Vyzhva, 2003) for parameter $c \approx 4,2 \cdot 10^{-3}$. In this case, the Gaussian type correlation function has form:

$$B(\rho) = \exp \{-c \rho^2\}, \quad c > 0. \quad (19)$$

This confirms the adequacy of simulated implementations to the real research data.

Based on this article, the authors have built an improved algorithm for the statistical simulation of Gaussian isotropic random fields on 3-D space with Gaussian type correlation function.

The "spectral density" is obtained by Gaussian type correlation function (19) as following formula:

$$f(\lambda) = \frac{\lambda^2}{2 \sqrt{\pi} c^3} \exp \left\{ -\frac{\lambda^2}{4 c} \right\}. \quad (20)$$

According to formula:

$$b_m(r) = \left(\frac{\pi}{c} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{2r} \exp \{ -2rc^2 \} I_{m+\frac{1}{2}}(2cr^2) \quad (21)$$

are calculated the "spectral coefficients", which correspond to the Gaussian type correlation function (19) and spectral density (20) formula of random field $\xi(r, \theta, \varphi)$, where $I_m(z)$ is the modified Bessel function of the first kind of order m .

These "spectral coefficients" authors used in proposed above algorithm. The statistical simulation of realizations of the homogeneous isotropic random fields $\xi_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 7, \dots, 20$ on 3-D space with Gaussian type correlation function can be done by means of constructed algorithm.

Earlier, based on the estimate from (Vyzhva et al., 2018b), and model (11), an algorithm for statistical modeling of realizations of Gaussian homogeneous isotropic random fields was described. In the case of the Bessel-type correlation function, this algorithm was constructed in following (Vyzhva et al., 2018a, 2018b). In the articles (Vyzhva et al., 2019, 2020) the considered algorithm was constructed for the spherical correlation function and in the paper (Vyzhva et al., 2020b) this algorithm was constructed for "cubic" correlation function.

Below authors describe the procedure for the statistical simulation of Gaussian homogeneous isotropic random fields $\xi(r, \theta, \varphi)$ realizations on 3-D space for random fields with Gaussian type correlation function.

The algorithm for random fields with Gaussian type correlation function.

1. The natural number N , which is summation limit, is chosen according to the required accuracy $\varepsilon > 0$ of the approximation of the model (11). In this case, for the Gaussian type correlation function "spectral coefficients" (21) of the model (11), the condition is fulfilled:

$$\frac{5\pi r^3}{2N^2} \mu_3 \leq \varepsilon \quad (22)$$

where

$$\mu_3 = 1/2\sqrt{\pi c^3} \int_0^\infty \lambda^5 \exp\left(-\frac{\lambda^2}{4c}\right) d\lambda.$$

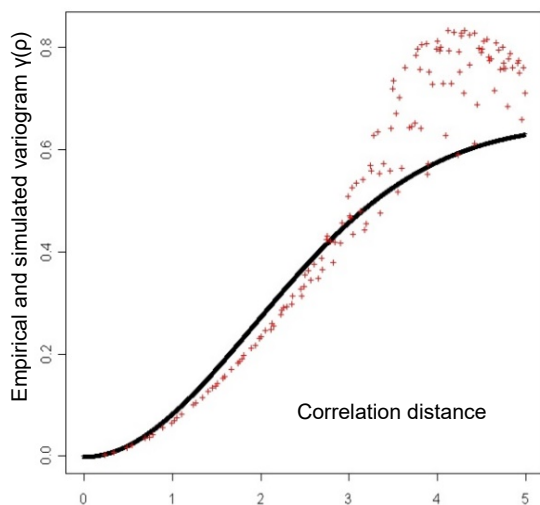


Fig. 3. Empirical (black line) and simulated (red crosses) variograms of input data arrays ΔT_{an} for PR7-PR20, which corresponding to Gaussian type correlation function $B(\rho) = \exp\{-c\rho^2\}$ ($c \approx 4,2 \cdot 10^{-3}$)

The variograms of input and simulated data arrays ΔT_{an} for PR7-PR20, corresponding to Gaussian type correlation function (25) at the value of the parameter $c \approx 4,2 \cdot 10^{-3}$ are shown in fig. 3 and fig. 4 respectively. This confirms the adequacy of simulated by this algorithm implementations to the real aeromagnetic survey research data. So, authors generated the adequate random component implementations on the study area in the Ovruch depression with twice detail for each profile, according to this algorithm.

The final stage of our method was the superimposing of realizations array $\xi_i(r, \theta, \varphi)$, $i = 7, \dots, 20$, that we got by

2. For the Gaussian type correlation function (19), the "spectral coefficients" $b_m(r)$, $m = 0, 1, 2, \dots, N$ are calculated as the integral (21).

3. Let's model the sequences of independent Gaussian normal random variables which have the form $\{c_{m,k}^l(r)\}$, $k = 1, 2$; $m = 0, 1, 2, \dots, N$; $l = 1, \dots, m$; which satisfying the conditions (22) with "spectral coefficients" (21).

4. By substituting the calculating number N , "spectral coefficients" values $b_m(r)$, $m = 0, 1, 2, \dots, N$, for the Gaussian type correlation function $\{c_{m,k}^l(r)\}$, $k = 1, 2$; $m = 0, 1, 2, \dots, N$; $l = 1, \dots, m$; and obtained in the previous items 3 sequences of Gaussian random variables into formula (11) for the model, authors calculate the realization value of the random field $\xi(r, \theta, \varphi)$ at the given point on 3-D space: $(r_i, \theta_j, \varphi_p)$, $i = 1, 2, \dots, I$; $j = 1, 2, \dots, G$; $p = 1, 2, \dots, P$.

5. Authors 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 Gaussian type correlation function).

The implementation of the above algorithm makes it possible to more accurately fill in the missing aeromagnetic survey data in the study area in the Ovruch depression. The authors generate additional data realizations of the random component in the points from investigation areas where geomagnetic measurements were not carried out (with a double precision interval of 50 meters compared to 100 meters between profiles). Next, a statistical analysis of implementations modeled according to this algorithm is carried out. For this purpose, semivariograms of arrays of input and simulated data were constructed.

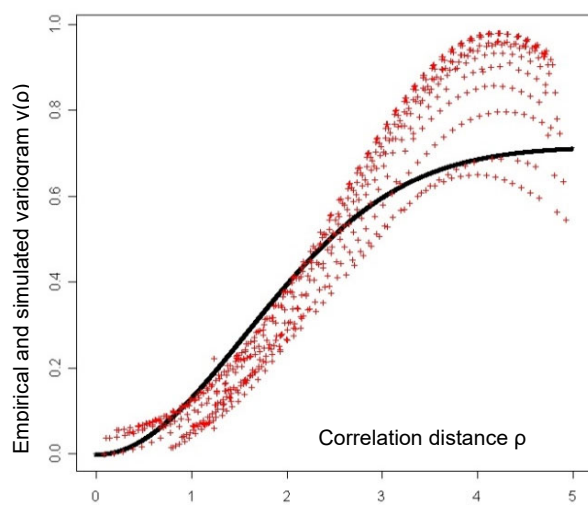


Fig. 4. Empirical (black line) and simulated (red crosses) variograms of simulated data arrays ΔT_{an} for PR7-PR20, which corresponding to Gaussian type correlation corresponding to Gaussian type correlation function $B(\rho) = \exp\{-c\rho^2\}$ ($c \approx 4,2 \cdot 10^{-3}$)

statistical simulation, on the spline approximation $S_i^{(1)}(r, \theta, \varphi)$, $i = 7, \dots, 20$ of real aeromagnetic survey data. Finally, authors received more detailed implementation for the geomagnetic observation data in the Ovruch depression selected area as a result of our modeling work. Authors built the map (a) of aeromagnetic survey data ΔT_{an} (general map) and the map (b) of aeromagnetic survey data ΔT_{an} with generated by the Gaussian type correlation function additional data in the points with double precision intervals in the Ovruch depression (fig. 5).

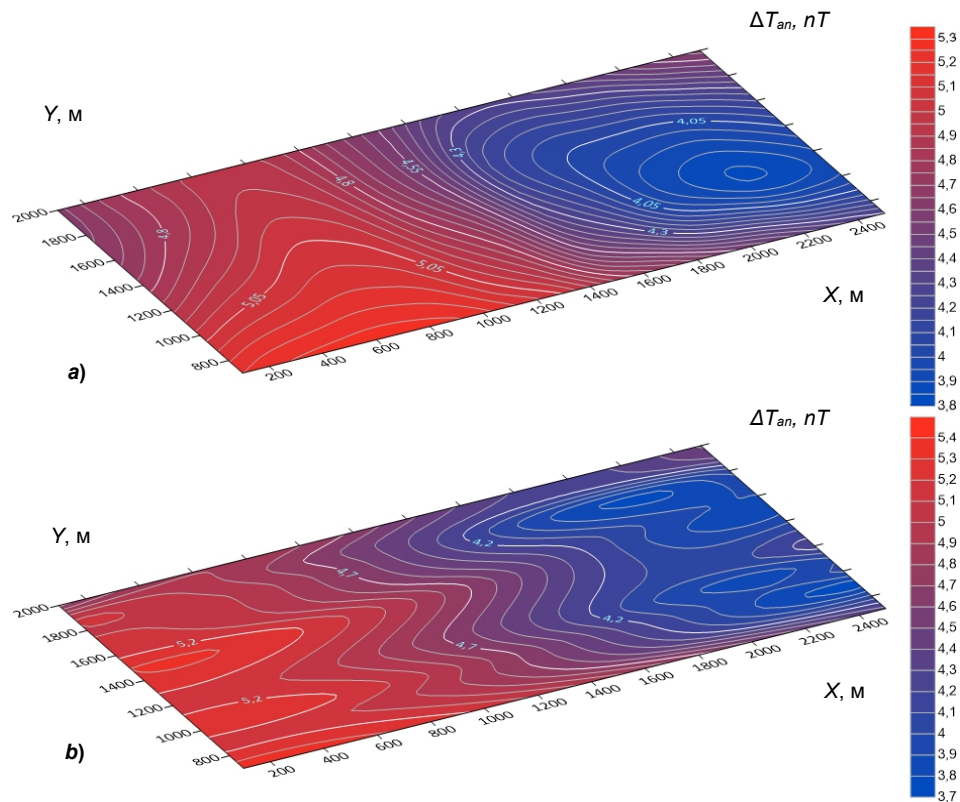


Fig. 5. a) The map of aeromagnetic survey data ΔT_{an} (general map) M 1:10 000, (PR 7-20); b) the map of aeromagnetic survey data ΔT_{an} plus generated with the Gaussian type correlation function additional data in the points with double precision intervals in the Ovruch depression M 1:10 000 (built in Surfer)

Conclusions

The method of statistical simulation of a random field on spatial three-dimensional realizations makes it possible to supplement the measurement results of the full vector of the magnetic field over a great square area in the Ovruch depression with a given detail.

The built variogram of random component for aeromagnetic survey data has the best approximation by theoretical variogram which is connected to the Gaussian type correlation function (the mean square deviation is 0,011), then in (Vyzhva et al., 2010; Vyzhva, Z., Vyzhva A., 2016) which is connected to the Bessel type correlation function (the mean square deviation is 0,225).

The algorithm for statistical simulation of realizations of Gaussian homogeneous isotropic random fields in three-dimensional space with a Gaussian-type correlation function proposed for use in this paper is an important addition to the Monte Carlo method used in geophysics. It can also be used to detect abnormal areas.

References

- Chiles, J.P., Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*, 2-nd ed. John Wiley & Sons, Inc.
- Tolosana-Delgado, R., Mueller, U. (2021). *Geostatistics for Compositional Data with R*. Berlin: Springer Cham.
- Vyzhva, Z., Fedorenko, K. (2013a). The Statistical Simulation of 3-D Random Fields by Means Kotelnikov-Shannon Decomposition. *Theor. Probability and Math. Statist.*, 88, 17–31.
- Vyzhva, Z., Fedorenko, K. (2013b). About the Statistical Simulation of Random Fields on the 3D Euclid Space. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Mathematics. Mechanics*, 30(2), 19–24.
- Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2010). The statistical simulation of random fields on the plane by spline approximation (on aerial magnetometry data example). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 51, 31–36 [In Ukrainian].
- Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2012). The statistical simulation of random processes and 2-D fields on aerial magnetometry. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 56, 52–55 [In Ukrainian].

Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2018a). About methods of random fields statistical simulation on the sphere by the aircraft magnetometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(82), 107–113. DOI: 10.17721/1728-2713.82.14.

Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2020a). The statistical simulation of dataset in 3-D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(91), 85–93. DOI: 10.17721/1728-2713.91.12.

Vyzhva, Z.O. (2003). About Approximation of 3-D Random Fields and Statistical Simulation. *Random Operator and Stochastic Equation*, 4, 3, 255–266.

Vyzhva, Z.O. (2011). The Statistical Simulation of Random Processes and Fields. *Obrii* [In Ukrainian].

Vyzhva, Z.O. (2021). The Statistical Simulation in Geology. PPC "Kyiv University". <https://mechmat.knu.ua/wp-content/uploads/2020/11/posibnyk-vyzhva.z.o.2doc.pdf> [In Ukrainian].

Vyzhva, Z.O., Vyzhva, A.S. (2016). About methods of statistical simulation of random fields on the plane by the aircraft magnetometry data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(75), 88–93.

Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2020b). The method of 3-D dataset statistical simulation with "cubic" correlation function on Rivne NPP example. *XIXth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, 11–14 May 2020, Kiev, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo080>.

Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2018b). The statistical simulation algorithm of random fields on the sphere by the aircraft magnetometry data. *XVIIth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, 14–17 May 2018, Kiev, Ukraine. DOI: 10.3997/2214-4609.201801796.

Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2019). About statistical simulation algorithm of dataset in 3-D area with spherical correlation function on Rivne NPP example. *XVIIIth International Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, 13–18 May 2019, Kiev, Ukraine.

Vyzhva, Z., Demidov, V., Vyzhva, A. (2020c). Statistical Simulation of 3-D Random Fields with Gaussian type correlation function by the Investigation of Aircraft Magnetometry Data. *XIV International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, 11–13 November 2020, Kyiv, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056086>.

Wackemagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics*, third edition. Springer-Verlag.

Yadrenko, M.Y. (1983). *Spectral theory of random fields*. Optimization Software Inc. Publications Division.

Отримано редакцією журналу / Received: 18.03.23
Прорецензовано / Revised: 15.05.23
Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Зоя ВИЖВА, д-р фіз.-мат. наук, проф.
e-mail: zoya_vyzhva@ukr.net
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
Всеволод ДЕМИДОВ, канд. фіз.-мат. наук, доц.
e-mail: fondad@ukr.net
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна
Андрій ВИЖВА, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: motomustanger@ukr.net
ДП "Науканафтогаз", Київ, Україна

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИПАДКОВИХ ПОЛІВ ІЗ ГАУССІВСЬКОЮ КОРЕЛЯЦІЙНОЮ ФУНКЦІЄЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДАНИХ МАГНІТОМЕТРІЇ

Розроблено універсальні методи статистичного моделювання (методи Монте-Карло) геофізичних даних із застосуванням Гауссівської кореляційної функції, які дають змогу розв'язати проблеми генерування адекватних реалізацій випадкових полів на сітці в тривимірному просторі будь-якої регулярності та детальності. Оскільки в геофізиці більшість результатів досліджень об'єктів подається у цифровій формі, точність якої залежить від різних випадкових впливів, то при цьому виникає проблема кондиційності карт у випадку, коли дані неможливо отримати із заданою детальністю в деяких ділянках спостережень. Для розв'язання проблем кондиційності карт, доповнення додатковими даними потрібної детальності результатів досліджень, для досягнення необхідної точності спостережень та інших проблем подібного роду в геофізичних задачах пропонується застосовувати методи статистичного моделювання випадкових полів.

Сформульовано алгоритм чисельного моделювання реалізацій однорідних ізотропних випадкових полів у тривимірному просторі з Гауссівською кореляційною функцією на основі теореми про оцінку середньоквадратичної апроксимації таких випадкових полів частковою сумою ряду "спектрального розкладу". На прикладі даних аеромагнітної зйомки в районі Оверуцької западини впроваджено запропонований алгоритм статистичного моделювання випадкових полів у розв'язанні проблем кондиційності карт шляхом доповнення даних змодельованими адекватними реалізаціями до необхідної детальності. Під час аналізу даних по профілях їх розділено на детерміновану (тренд) та випадкову складові. Тренд даних пропонується наближати кубічними сплайнами, однорідну ізотропну випадкову складову – моделювати на основі "спектрального розкладу" випадкових полів у тривимірному просторі. Модельний приклад – дані аеромагнітної зйомки на території Оверуцької западини. За наведеним алгоритмом було отримано реалізації випадкової складової в області дослідження із подвійною детальністю по кожному профілю. Перевіряючи їх на адекватність, зроблено висновки, що відповідна гістограма випадкової складової має гауссівський розподіл. Побудована варіограма цих реалізацій має найкраще наближення теоретичною варіограмою, яка пов'язана з кореляційною функцією Гауссівського типу. У результаті накладення змодельованого масиву випадкової складової на сплайнову апроксимацію реальних даних отримано більш детальну реалізацію для даних геомагнітних спостережень у виділеній області. Проведено порівняльний аналіз результатів моделювання реалізацій випадкових полів із Гауссівською кореляційною функцією з іншими кореляційними функціями. Отже, метод статистичного моделювання реалізацій випадкових полів у тривимірному просторі з Гауссівською кореляційною функцією дає можливість максимально адекватно доповнити даними із заданою детальністю результати вимірювань повного вектора напруженості магнітного поля.

К л ю ч о в і с л о в а : статистичне моделювання, спектральний розклад, Гауссівська кореляційна функція, 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 550

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.12>

Юрій СТАРОДУБ, д-р фіз.-мат. наук, проф.

e-mail: George_Starodub@yahoo.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

Андрій ГАВРИСЬ, канд. техн. наук, доц.

e-mail: havrys.and@gmail.com

Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Львів, Україна

Олеся КОЗІОНОВА, інж.

e-mail: rapakivi@ukr.net

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВИВЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ НАВАНТАЖЕНИХ МОСТОІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

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

Представлено приклади використання методики моделювання впливу еколого-геофізичного стану ґрунтів на об'єкти мостового типу з використанням методу скінченних елементів. Проведено огляд публікацій моделювання напружено-деформованого стану складно побудованих мостових конструкцій в умовах техногенного впливу навколишнього середовища. Розглянуто приклади вивчення стану навантажених ґрунтів у основі мостів, побудованих у населених пунктах. Як приклад проведено моделювання напружено-деформованого стану ґрунтів під двома складними мостовими конструкціями. Показано зміни напружень-деформацій таких ґрунтів у разі збільшення навантажень на мости та зміни виду мостових конструкцій. Підтверджено ефективність застосування методу скінченних елементів для моделювання процесів вивчення та зміни напружень і деформацій у породах під складно побудованими конструкціями та виявлення типових проявів зміни напружено-деформованого стану, які важливі для швидкої оцінки стану ґрунтів.

Ключові слова: напружено-деформований стан, ґрунти, навантажені інженерні об'єкти.

Вступ

На сьогодні, за інформацією Міністерства інфраструктури, в Україні загалом функціонує понад 16 тисяч мостів різних типів та конструктивних рішень. Водночас, за даними "Укравтодору", лише близько 7,5 тис. з них (тобто майже 50 %) відповідають чинним нормам і стандартам, тоді як інша частина об'єктів підлягає реконструкції. Проте, згідно з обстеженням мостового господарства, здійсненого держагенцією в 2019 р., негайного ремонту потребує 895 мостів (з них 169 перебувають у передаварійному стані), що значно відрізняється від даних "Укравтодору". Така значна різниця в оцінках може бути зумовлена недобросовісною перевіркою цих споруд або неповною інформацією про їхній стан. Зрозуміло, що в сьогоденних умовах війни кількість мостоінженерних споруд, що підлягають ремонту або реконструкції, невпинно зростає.

Недостатня інформація про існуючі опорні конструкції та фундаменти мостів створює значні проблеми для оцінки стану конструкції та може спричинити значну невизначеність щодо безпеки та їхньої працездатності. Характеристика та оцінка стану опорної конструкції та фундаменту мостів не тільки допоможе знизити їх вразливість до природних небезпек, але й надасть можливості для їх повторного використання із значними вигодами.

Постановка проблеми. Задачі вивчення ґрунтових масивів земної кори в районі мостоінженерних конструкцій методами комп'ютерного моделювання тісно пов'язані з вибором методу їхнього розв'язання. Один з ефективних методів вирішення даних задач – метод скінченних елементів (МСЕ), який має широке застосування і використовувався авторами в попередніх дослідженнях (Стародуб та ін., 2007, 2020) для визначення напружено-деформованого стану простих конструкцій. Проте ефективність застосування даного методу під час вивчення складнопобудованих залізобетонних інженерних споруд автори не досліджували.

Метою статті є моделювання (обчислення) деформацій і напружень у складнопобудованих мостоінженерних спорудах залізобетонного типу внаслідок зовнішніх

впливів навантаження на конструкції та їх вплив на природу ґрунтів у опорах моста. Необхідно дослідити їх геофізичну природу: вплив зміни модулів Юнга і Пуассона, відповідно швидкостей поздовжньої хвилі і хвилі зсуву, значення навантажень, що призводять до зміни деформацій і напружень на основі інтерактивного комп'ютерного моделювання.

Метою роботи є запобігання виникненню надзвичайних ситуацій на мостоінженерних спорудах шляхом удосконалення захисту на основі моделювання та теоретичного визначення критично допустимих значень напружено-деформованого стану ґрунтового масиву під дією навантажень інженерних споруд мостового типу. Такі дослідження, зокрема, також важливі для моніторингу профільно-диференційованих ґрунтів на ділянках технологічного впливу на навантажені об'єкти (Вижва, 2004; Вижва та ін., 2008; Karabyn et al., 2019).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У статті (Müzel et al., 2020) було досліджено властивості композиційних матеріалів, що почали широко використовуватися у спорудженні будівельних конструкцій, у тому числі мостоінженерних. Автори використали метод скінченних елементів як спосіб аналізу композиційних матеріалів, підданих різноманітному впливу залежно від функціонального призначення. Всі дослідження проведено на мікрорівні без практичних випробувань і комп'ютерного моделювання на спорудах.

У роботі (Mao et al., 2019) досліджується доцільність використання методів ідентифікації конструкції для характеристик і фундаментів мостів за допомогою МСЕ. Автори досліджували всі основні фактори, що становлять інтерес для характеристик оцінки опорної конструкції мостів, включаючи глибину закладення фундаменту, тип фундаменту, матеріал, геометрію фундаменту, цілісність підконструкції, граничний стан, її несучу здатність, вразливість підконструкції до деформації та термін служби, що залишився. Для оцінки цих параметрів було досліджено багато інструментів і технологій, таких як неруйнівна оцінка, руйнівний контроль, випробування навантаженням, чисельне моделювання, геотехнічне та

геофізичне дослідження місця, аналіз на основі ризику та статистичні процедури. Проте за досліджуваний взірць автори взяли трипрогінний міст з простою опорою без поєднання метало-армованих конструкцій.

У статті (Shah et al., 2018) проведено дослідження працездатності конструкцій з використанням методу скінченних елементів, на прикладі як непошкоджувального, так і пошкоджувального тесту мостів, які мають однакові фізичні параметри. Метою було проаналізувати нелінійну зміну поведінки пошкодження, яке утворюється на прикладі тестового моста, коли деякі умови навантаження моделюються за допомогою МСЕ. За словами авторів, два тестові мости представляють моделі реальних мостів, які використовуються в повсякденному житті. Отже, у реальному випадку, як ці два тестові мости, моделювання фактично шляхом порівняння. Проте, як визначають самі автори статті, у разі використання даного дослідження на реальних спорудах можлива похибка.

Автори роботи (Aydin, Özkaaya, 2018) досліджували сучасні методи, які використовуються для оцінки навантажень на обрушення кладкових арок мостів, та проводили дослідження, спрямоване на розрахунок поведінки однопрогінних мурованих аркових мостів за певних навантажень методом статичного аналізу. Модель досліджували за допомогою програми пакета ANSYS на прикладі історичного мосту Сарпдере. Результати дослідження підтвердили історичні літературні дані. Проте використання даних методів на сучасних мостоінженерних спорудах не розглядалося і є предметом дослідження авторів статті.

У роботі (Lu et al., 2020) запропоновано використання нової моделі – моделі Крігінга, що використовується для інтелектуального аналізу та прогнозування фактичної жорсткості існуючих мостів, а також для високоточного прогнозування експериментальних результатів статичного навантаження. Для моделювання та аналізу отриманих даних автори використали програмне забезпечення ANSYS, що базується на використанні МСЕ. Тому адекватність перевірки даної моделі потрібно додатково дослідити з погляду використання двох різних моделей для аналізу.

Автори статті (Diez et al., 2016) запропонували новий підхід, оснований на кластеризації, до групових підструктур або з'єднань мосту з подальшим виявленням аномальних або пошкоджених структур мостоінженерних споруд. Згідно з дослідженням цей підхід базується на комбінації поверхневого аналізу ознак ушкоджень та визначення критичних з'єднань, на які впливає вібрація від транспорту, що проїжджає, за допомогою тріосьових акселерометрів. Проте даний підхід не враховує додаткові навантаження, які можуть діяти на міст через вплив геофізичних явищ (наприклад, землетрусів) та поєднання їх з іншими вібраційними процесами зовнішнього середовища.

У роботі (Moravej et al., 2019) запропоновано застосувати модульний байєсівський підхід для калібрування скінчено-елементної моделі бетонного коробчастого моста в лабораторному масштабі. Автори вперше використали такий підхід для оцінки скінчено-елементної моделі реальної конструкції для двох станів – неушкодженого і пошкодженого (пошкоджений стан являє собою зміни структурних параметрів внаслідок старіння або перевантаження). Функції розбіжності використовуються для визначення відхилення між результатами експериментальної та чисельної моделей, що в подальшому замінено гаусовими процесами для полегшення обчислення. Хоча даний метод досить інформативний, проте способи застосування його потребують подальшого аналізу.

Методологія. У задачах моделювання напружено-деформованого стану у земному середовищі складної структури порід розв'язують динамічну задачу теорії пружності, враховуючи нелінійні явища. Середовище умовно розбивають на елементи скінченного розміру, які враховують важливі зміни у структурах. Дослідження поведінки структур з допомогою вивчення рухів певних скінченних елементів і оптимізації рухів елементів, на які умовно розбивають неперервні фізичні величини, апроксимують кусково-неперервними функціями на скінченній кількості елементів. Вигідно представляти такі функції поліномами, які визначаються для кожного елемента. Зокрема, форми елементів встановлюють порядок полінома, які визначають переміщення методом скінченних елементів (Bathe, 1996). Задача зводиться до розв'язання матричного рівняння або системи лінійних рівнянь, загальний вигляд якої можна представити у вигляді

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = f, \quad (1)$$

де $U, \dot{U}, \ddot{U}$ – вектор відповідно переміщень, швидкостей переміщень і прискорень у вузлах елементів структури; f – вектор суми концентрованих сил у вузлах і сил на поверхневих границях структур, які можуть залежати від часу; K – матриця жорсткості системи, яка визначається залежністю напружень від переміщень і деформацій; M – матриця мас елементів структури, з яких складається тіло. Рівняння (1) є матричним виразом, який виражає узагальнений вигляд другого закону Ньютона, де матриця C враховує демпфування переміщень.

Якщо перенести перший і другий доданки рівняння (1) в праву частину, отримуємо формулу

$$KU = R, \quad (2)$$

де матриця R визначається як $R = f - (M\ddot{U} + C\dot{U})$. Остання формула враховує у правій частині можливі динамічні і квазідинамічні (повільні) рухи в системі, які визначаються рухами елементів структури.

В (2) R – матриця-стовпчик, – враховує навантаження, представляється у вигляді

$$R = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{V^{(e)}} N^{(e)T} f^{(e)} dv^{(e)},$$

де $f^{(e)}$ – вектор навантаження на елемент (e) тіла; $N^{(e)}$ – матриця функцій форми встановлює залежність між вектором переміщень $u(r)$ і узагальнених переміщень U :

$$u(r) = N^{(e)}U.$$

Математична модель, що використовується, описує напружено-деформований стан у ґрунтовому масиві під навантаженням конструкції мостового типу. Для визначення сили використовують критерій наближення Мора-Кулона, згідно з яким отримуємо співвідношення для сили навантаження для тривимірного випадку (модель Друкера-Прагера (Doltsinis, 2018):

$$f^{(e)} = 3\alpha\sigma_m + \sigma_{eqv} - k,$$

де $\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ – гідростатичне напруження;

$\sigma_{eqv} = \sqrt{0.5 \sqrt{(s_x^2 + s_y^2 + s_z^2)/2 + (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}}$ – девіаторне напруження, характеризує зміну форми без зміни його об'єму, з параметрами: $s_x = \sigma_{xx} - \sigma_m$, $s_y = \sigma_{yy} - \sigma_m$,

$s_z = \sigma_{zz} - \sigma_m$; $\alpha = \frac{2\sqrt{3} \cdot \sin \varphi}{3(3 - \sin \varphi)}$, $k = \frac{2\sqrt{3} \cdot c \cdot \cos \varphi}{(3 - \sin \varphi)}$, тут α ,

k – коефіцієнти для обчислення сили $f^{(e)}$. У формулі

c – коефіцієнт, який визначає питоме зчеплення; φ – кут внутрішнього тертя в рамках моделі Друкера–Прагера (в кутових градусах).

Матрицю жорсткості K визначають у такому вигляді (Стародуб та ін., 2007):

$$K = \sum_{e=1}^{N_e} \int_{V^e} B^{(e)T} D^{(e)} B^{(e)} dV^{(e)}. \quad (3)$$

Матриця $B^{(e)}$ визначається із залежності між векторами

$$\text{деформації } \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}^T, \quad \varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x},$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \text{ і узагальненого переміщення } \varepsilon = B^{(e)} U, \text{ де мат-}$$

риця деформацій у розглянутому випадку записується у матрично-векторній формі для компонент $u(r)$ і v переміщення відповідно по осях X і Y Декартові системи координат; $D^{(e)}$ – матриця напружень-деформацій матеріалу, визначається законом Гука для напруження $\sigma = D^{(e)} \varepsilon$.

Результати моделювання. Описаним методом моделювання напружено-деформованого стану середовища, обрано натурну модель, яку представлено на рис. 1: міст біля села Калинівка Яворівського району Львівської області (1а – загальний вигляд, 1б – вигляд арки моста із симетричним навантаженням на опори).

З метою вивчення збільшення впливу навантаження на ґрунт під складною мостовою конструкцією, від початку було розглянуто модель, коли ґрунт моделювався стиснутим аргелітовим вапняком із швидкістю поздовжніх хвиль близько 2300 м/с, для типового значення

коефіцієнта Пуассона приблизно 0,3 і густини породи 18000 кг/м³. Водночас питоме зчеплення взяте $c = 10^3$ Па, кут внутрішнього тертя породи $\varphi = 35$ град. Для пружних властивостей металевої конструкції моста приймаємо значення для поздовжніх хвиль 3150 м/с, густину матеріалу – 2550 кг/м³.

Задаючи граничні умови, врахуємо жорстке закріплення нижньої границі у модельних прикладах. З метою економії пам'яті в моделі проводимо вісь симетрії по правому її краю – таке припущення відповідає вигляду моделі на рис. 1б. Однак обмеження на рух у горизонтальному напрямку не забороняє рухів у вертикальному, зокрема вздовж осі симетрії. Навантаження завдяки силі ваги напрямлені у вертикальному напрямку (від'ємному напрямку вздовж осі Y). Верхня границя моделі – вільна, права – має ролюкові властивості (можливий рух вверх-вниз, відповідає вертикальному руху). Для моделі напружено-деформованого стану середовища Друкера–Прагера пружна поведінка ґрунту породи виражається через коефіцієнт Пуассона ν і об'ємну густину γ , які мають вигляд

$$\sigma_{xx} = \lambda \sigma_{yy}, \quad \sigma_{yy} = -\gamma y, \quad \lambda = \frac{\nu}{(1-\nu)}. \quad (4)$$

Властивості матеріалу моделі такі: ґрунту – модуль Юнга для ґрунту і металевої конструкції моста, відповідно, $E = 10^6$ Па та 10^9 Па; коефіцієнт Пуассона для ґрунту і металевої конструкції моста $\nu = 0,3$; питома вага, відповідно, $\gamma = 18 \cdot 10^3$ Н/м³ та $56 \cdot 10^3$ Н/м³; для ґрунтового масиву питоме зчеплення $c = 10^5$ Па, кут внутрішнього тертя породи $\varphi = 35^\circ$.

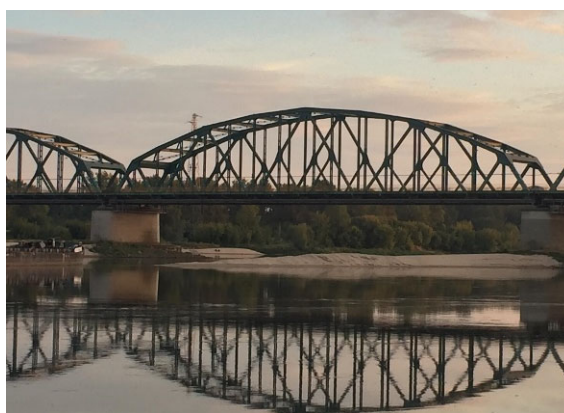


Рис. 1. Міст біля с. Калинівка Яворівського району Львівської області. У горизонтальному напрямку розмір моделі – 45 м відповідає осі X , вертикальний розмір моделі відповідає осі Y (масштаб однаковий): а – загальний вигляд, б – вигляд арки моста з навантаженням

Як видно з рис. 2 а-д деформація ґрунту під опорою моста зростає у разі зростання навантаження від 10 до 50000 т. Практично 100-відсоткова деформація поширюється по всій нижній модельованій частині ґрунту. Це призводить до збільшення напружень (якщо порівнювати із сусідніми частинами області моделювання ґрунту під опорою моста), яке проявляється у зростанні напружень та концентрації ізоліній напружень в околі дотику опори моста до ґрунту. Значення напруження на ізолініях моделі зростають у місці опори моста приблизно у п'ять разів – від $1,7 \cdot 10^5$ Н/м² до $5,6 \cdot 10^5$ Н/м². Можливі руйнування

породи в умовах дотику конструкції до основи шукаємо у Державних будівельних нормах, а саме "ДБН В.1.2-6:2021: Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість" (ДБН В.1.2-6:2021, 2021). Уточнені дані отримуємо з натурних спостережень.

Згідно з ДБН В.1.2-14:2018 (безпечними вважаються ґрунти, навантаження яких у 100 разів менше за граничні значення) (ДБН В.1.2-14:2018, 2018) та з натурних спостережень можна стверджувати, що змодельовані навантаження до 50000 т для моста біля с. Калинівка Яворівського району Львівської області створюють можливість аварійної ситуації.

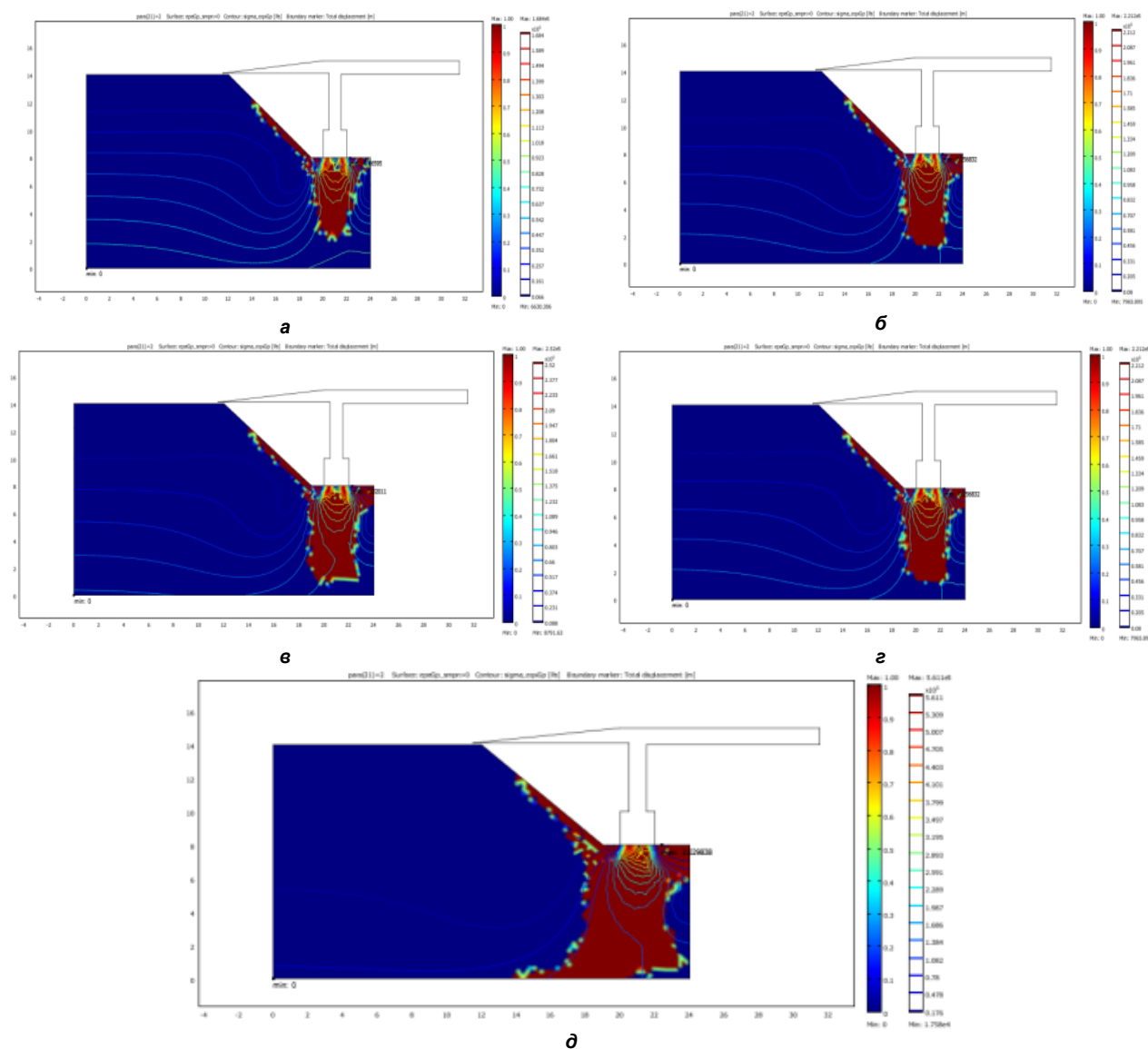


Рис. 2. Розподіл деформацій ґрунту у кольорах від коричневого (максимальна деформація) до синього (мінімальна) та розподіл ізоліній напружень (аналогічні кольори) в моделі за збільшення навантаження на арку моста від 10 т до 50 кт
а – 10 т, б – 1000 т, в – 10000 т, г – 15000 т, д – 50000 т

Наступною моделлю, яку досліджено щодо впливу виду конструкції на розподіл напружень і деформацій, була модель моста у місті Червоноград Яворівського району Львівської області, (рис. 3). Дану конструкцію вже розглянуто у статті (Стародуб та ін., 2020), проте в цьому випадку змінюється тип ґрунту та вага мостоінженерної споруди, що дає змогу порівняти вже існуючі результати з новими. А саме: з визначенням напружено-деформованим станом ґрунтового масиву, питома вага якого становить 18 кН/м^3 , питоме зчеплення 10 кПа , що відповідає фізико-механічним характеристикам пухкої піщано-глинистої осадової гірської породи ґрунту – супіску. Питома вага мостоінженерної споруди становить 56 кН/м^3 , відповідно до характеристик залізобетону.

Характеристики моделі такі: модуль Юнга для ґрунту і металевої конструкції моста відповідно $E = 10^6 \text{ Па}$, 10^9 Па ; коефіцієнт Пуассона для ґрунту і металевої конструкції моста $\nu = 0,3$; питома вага ґрунту і залізобетонної конструкції моста відповідно $\gamma = 15 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$, $60 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$;

питоме зчеплення $c = 10^5 \text{ Па}$, кут внутрішнього тертя породи $\phi = 35^\circ$.

На прикладі моделі, яка повторює конструкцію моста, бачимо, що в ненапруженому випадку – під дією лише напружень від ваги моста, ізолінії напружень, на відміну від попередньої конструкції, зростають в напрямку, протилежному до денної поверхні. Аналогічний ефект зростання напружень має місце з глибиною – від $2,5 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ до $2,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, що спостерігаємо і для навантаженої моделі (вагон вагою 35 т). Область максимальних деформацій розширюється і проникає на глибину, однак напруження зростають приблизно на 10 %, що згідно з ДБН В.1.2-6:2021 (ДБН В.1.2-6:2021, 2021) не створює катастрофічної ситуації.

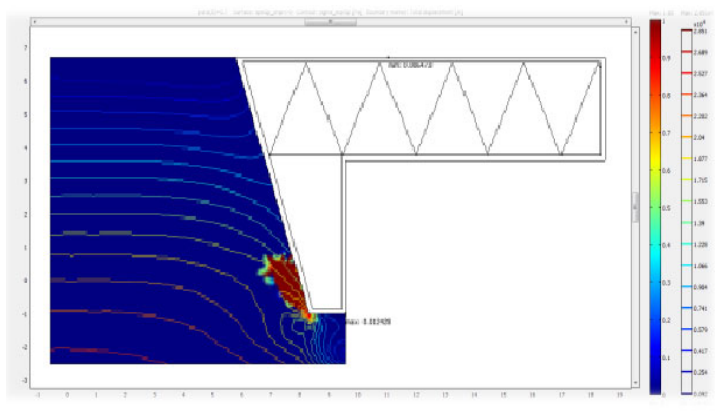
Результати нового моделювання практично відтворюють підсумки попередніх розрахунків, що може бути пов'язане зі збільшенням питомої ваги досліджуваної конструкції і зміною типу ґрунту на супісок. Це доводить правильність методу моделювання для різних мостоінженерних конструкцій зі змінними параметрами.



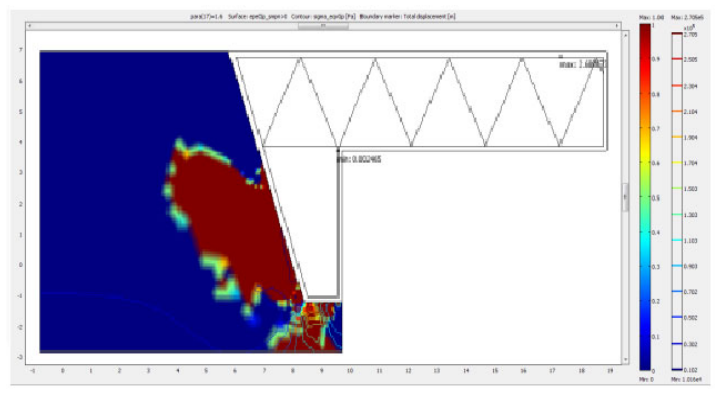
а



б



е



г

Рис.3. Міст по вул. Львівській в м. Червоноград Яворівського району Львівської області:

а – загальний вигляд без навантаження; б – вигляд залізобетонної конструкції мосту.

Результати моделювання напружено-деформованого стану гірських порід у фундаментах конструкцій каркасного типу: в – розрахунок для ненавантаженої моделі; г – модель навантажена потягом

Висновки та перспективи розвитку розглянутого напрямку. На основі моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового масиву під дією навантажень інженерних споруд мостового типу для двох реальних моделей, було встановлено:

- для мосту біля с. Калинівка Яворівського району Львівської області помітна деформація поширюється по всій нижній змодельованій частині ґрунту і призводить до збільшення напружень в околі дотику опори моста до ґрунту. Значення напруження на ізолініях моделі зростають у місці опори моста приблизно у п'ять разів – від $1,7 \cdot 10^5$ Н/м² до $5,6 \cdot 10^5$ Н/м².

Згідно з ДБН та натурними спостереженнями можна сказати, що змодельовані навантаження до 50000 т для мостової споруди створюють можливість аварійної ситуації.

- для мосту в м. Червоноград Яворівського району Львівської області ефект зростання напружень має місце з глибиною – від $2,5 \cdot 10^6$ Н/м² до $2,8 \cdot 10^6$ Н/м², що спостерігаємо і для навантаженої вагою 35 т моделі. Область максимальних деформацій розширюється і проникає на глибину, але згідно з (ДБН В.1.2-6:2021, 2021) не створює катастрофічної ситуації.

Використання застосованого в роботі методу скінченних елементів дає змогу моделювати процеси вивчення напружень і деформацій у складнобудованих конструкціях, що є важливим для швидкої оцінки їхнього стану, особливо у випадку напружень, які можуть бути в різного роду катастрофічних ситуаціях, пов'язаних з природними і техногенними винятковими ситуаціями, зокрема, при врахуванні найгірших екстраординарних процесів. Особливо актуальним це стає нині, коли велика кількість

мостостроїтельних споруд у зоні військових дій зазнає впливу навантажень, спричинених вибуховими хвилями.

У всіх названих випадках метод швидкої оцінки стану навколишнього середовища, з можливістю прогнозування його становища шляхом математичного моделювання з використанням комп'ютерних алгоритмів і методів, одним з яких є МСЕ, на сучасних ЕОМ є важливим і незамінним.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А. (2004). Теорія і методологія комплексної геодинамічної інтерпретації даних геофізичного моніторингу небезпечних геологічних процесів. Дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.22. Київський національний університет імені Тараса Шевченка.
- Вижва, С.А., Винниченко, О.Б., Кендзера, О.В. (2008). Вплив природних і техногенних процесів на потенційно небезпечні об'єкти. ВПЦ "Київський університет".
- ДБН В.1.2-6:2021. (2021). Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість.
- ДБН В.1.2-14:2018. (2018). Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд.
- Стародуб, Ю., Гавриш, А., Козинова, О. (2020). Моделювання впливу еколого-геофізичного стану ґрунтів на інженерні мостобудівні об'єкти. Вісник київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 3(90), 97–103.
- Стародуб, Ю.П., Кендзера, О.В., Купльовський, Б.Є. (2007). Методика моделювання хвильових полів і напружено-деформованого стану в неоднорідному півпросторі з використанням методу скінченних елементів. Центр математичного моделювання ІППММ НАН України. Препринт № 07.
- Aydin, A.C., Özkaya, S.G. (2018). The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Engineering Failure Analysis*, 84, 131–138.
- Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.
- Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier.

Diez, A., Khoa, N.L.D., Makki Alamdari, M., Wang, Y., Chen, F., Runcie, P. (2016). A clustering approach for structural health monitoring on bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 429–445.

Doltsinis, I. (2018). A note on the stiffness and flexibility natural approach to the training spring cell. *Engineering Computations*, 35(3), 1130–1139.

Karabyn, V., Popovych, V., Shainoha, I., Lazaruk, Y., (2019). Long-term monitoring of oil contamination of profile-differentiated soils on the site of influence of oil-and-gas wells in the central part of the Boryslav-Pokuttya oil-and-gas bearing area. *Petroleum and Coal*, 61(1), 81–89.

Lu, P., Xu, Z., Chen, Y., & Zhou, Y. (2020). Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model. *Engineering Structures*, 214, 110641.

Mao, Q., Mazzotti, M., DeVitis, J., Braley, J., Young, C., Sjoblom, K., Bartoli, I. (2019). Structural condition assessment of a bridge pier: A case study using experimental modal analysis and finite element model updating. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), e2273.

Moravej, H., Chan, T. H., Nguyen, K.D., Jesus, A. (2019). Vibration-based Bayesian model updating of civil engineering structures applying Gaussian process metamodel. *Advances in Structural Engineering*, 22(16), 3487–3502.

Müzel, D.S., Bonhin, E.P., Guimarães, N.M., Guidi, E.S. (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, 12(4), 818.

Shah, A.A., Chowdhry, B.S., Daudpoto, J., Ali, I. (2018). Transient structural health monitoring of the test bridges using finite element method. *5th International multi-topic ICT conference (IMTIC)*, 2018, pp. 1–7. IEEE.

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

References

Aydin, A.C., Özkaya, S.G. (2018). The finite element analysis of collapse loads of single-spanned historic masonry arch bridges (Ordu, Sarpdere Bridge). *Engineering Failure Analysis*, 84, 131–138.

Bathe, K.-J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall.

Chen, W.F., Mizuno, E. (1990). *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*. Elsevier.

DBN V. 1.2-14:2018. (2018). Zahalni pryntsyropy zabezpechennia nadiinosti ta konstruktivnoi bezpeky budiveli i sporud [in Ukrainian].

DBN V.1.2-6:2021. (2021). Osnovni vymohy do budiveli i sporud. Mekhanichnyy opir ta stiykist' [in Ukrainian].

Diez, A., Khoa, N.L.D., Makki Alamdari, M., Wang, Y., Chen, F., Runcie, P. (2016). A clustering approach for structural health monitoring on bridges. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(3), 429–445.

Doltsinis, I. (2017). *Progress report, DAAD Project-ID 57213102: Application of Spring Lattice Models for Shell Structures, ISD-Stuttgart, August 2017, 1–10*

Yuriy STARODUB, DSc (Phys. & Math.), Prof.

e-mail: George_Starodub@yahoo.com

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Andrii HAVRYS, PhD (Tech.), Assoc. Prof.

e-mail: havrys.and@gmail.com

Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

Olesia KOZIONOVA, Engineer

e-mail: rapakivi@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Karabyn, V., Popovych, V., Shainoha, I., Lazaruk, Y., (2019). Long-term monitoring of oil contamination of profile-differentiated soils on the site of influence of oil-and-gas wells in the central part of the Boryslav-Pokuttya oil-and-gas bearing area. *Petroleum and Coal*, 61(1), 81–89.

Lu, P., Xu, Z., Chen, Y., & Zhou, Y. (2020). Prediction method of bridge static load test results based on Kriging model. *Engineering Structures*, 214, 110641.

Mao, Q., Mazzotti, M., DeVitis, J., Braley, J., Young, C., Sjoblom, K., Bartoli, I. (2019). Structural condition assessment of a bridge pier: A case study using experimental modal analysis and finite element model updating. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(1), e2273.

Moravej, H., Chan, T. H., Nguyen, K.D., Jesus, A. (2019). Vibration-based Bayesian model updating of civil engineering structures applying Gaussian process metamodel. *Advances in Structural Engineering*, 22(16), 3487–3502.

Müzel, D.S., Bonhin, E.P., Guimarães, N.M., Guidi, E.S. (2020). Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*, 12(4), 818.

Shah, A.A., Chowdhry, B.S., Daudpoto, J., Ali, I. (2018). Transient structural health monitoring of the test bridges using finite element method. *5th International multi-topic ICT conference (IMTIC)*, 2018, pp. 1–7. IEEE.

Starodub, Yu., Havrys, A., Kozionova, O. (2020). Modeling of the effects of the environmental-geophysical state of soils on engineering building objects. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(90), 97–103 [in Ukrainian].

Starodub, Yu.P., Kendzera, O.V., Kupl'ovskyy, B.Ye. (2007). Metodyka modelyuvannya khvylovykh poliv i napruzhenno-deformovanoho stanu v neodnorodnomu pivprostori z vykorystannam metodu skinchenykh elementiv. Tsentral'no-matematichnoho modelyuvannya IPPMM NAN Ukrainy. Preprint № 07 [in Ukrainian].

Vyzhva, S.A. (2004). Teoriya i metodolohiya kompleksnoyi heodynamichnoyi interpretatsiyi danykh heofizychnoho monitorynhu nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv. *Thesis ... Dr. Sci. (Geol.): 04.00.22*. Taras Shevchenko National University of Kyiv [in Ukrainian].

Vyzhva, S.A., Vynnychenko, O.B., Kendzera, O.V. (2008). Vplyv pryrodnykh i tekhnichnykh protsesiv na potentsiyno nebezpechni ob'ekty. *VOC "Kyiv University"* [in Ukrainian].

Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. (2005). *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. Elsevier.

Отримано редакцією журналу / Received: 28.04.23

Прорецензовано / Revised: 13.06.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

STUDY OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF SOILS OF LOADED ENGINEERING OBJECTS

The article presents examples of the use of the method of modelling the influence of the ecological and geophysical state of the soil on bridge-type objects using the finite element method. A review of publications on modelling the stress-strain state of complex bridge structures under man-made environmental influences was conducted. Examples of studying the state of loaded soils at the base of bridges built in populated areas are considered. As an example, modeling of the stress-strain state of soils under two complex bridge structures was carried out. Changes in stress-strain of such soils are shown when the loads on bridges increase and when the type of bridge structures changes. The effectiveness of using the finite element method for modelling the processes of studying and changing stresses and deformations in rocks under complex structures and identifying typical manifestations of changes in the stress-strain state, which are important for a quick assessment of the soil condition, has been confirmed.

Keywords: stress-strain state, soils, loaded engineering objects.

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 004.422.61:(551.1:622.011:628.4.032/.034)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.102.13>

Олександр АЗІМОВ, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: azimov@casre.kiev.ua

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України, Київ, Україна

Олексій РОГОЖИН, д-р екон. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: olexarog@gmail.com

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

Олександр ТРОФИМЧУК, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України
e-mail: Trofymchuk@nas.gov.ua

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОБІТ ЩОДО ПОВОДЖЕННЯ З ГЕОЛОГІЧНИМ СЕРЕДОВИЩЕМ У КОНТЕКСТІ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром техн. наук, проф. В.І. Зацерковним)

Розглянуто сучасні світові підходи до поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ). Охарактеризовано два класи об'єктів їх локалізації – несанкціоновані звалища та полігони захоронення, що відіграють різну функціональну роль у поводженні з відходами. Разом із вмісними і навролишніми компонентами довкілля полігони і звалища являють собою своєрідну природно-техно(антропо)генну систему. Оскільки власне відходи видаляються до геологічного середовища (ГС), то в рамках загалом цієї системи розглядається техногенно-геологічна підсистема, яка може бути відображена відповідною функціональною моделлю або ж інфогеофреймом за призначенням (цільовим).

Концептуально запропоновано методичний комплекс інформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з ГС, у якому ТПВ локалізуються. Комплекс повинен включати два блоки: створення прогностно-палеореконструктивної ретроспективно-статичної моделі ГС і створення комплексної еколого-геологічної моделі техногенно-геологічного об'єкта. Отже, основним робочим інструментом інформаційного забезпечення різноманітних дій стосовно поводження з об'єктами локалізації ТПВ у ГС є надання інформаційних моделей конкретних інфогеофреймів. Зміст таких еколого-геологічних моделей визначається цілями і завданнями поводження з референтним класом об'єктів (абстрактним інфогеофреймом). Наведено приклад наповнення деякими даними інформаційної моделі і впровадження її для Київського полігона захоронення ТПВ № 5.

Визначено основні напрями подальшого розвитку інформаційного моделювання розглянутої сфери досліджень.

Ключові слова: тверді побутові відходи, звалища, полігони, техногенно-геологічна (під)система, інформаційне забезпечення робіт.

Вступ

Загальна маса світового потоку побутових відходів становить щорічно близько 2 млрд т (Chen et al., 2020), з них 70 % знищується шляхом складування на полігонах (Kaza et al., 2018). Разом з тим сьогодні більша частина побутових відходів накопичується на звалищах, велика кількість з яких є несанкціонованими (самочинними).

В Україні щодо побутових і подібних до них відходів (ППВ) відзначають неухильне зростання обсягів їх збору. Згідно з чинним законодавством України об'єкти, що негативно впливають на стан довкілля, підлягають державному обліку (Закон..., 1991, ст. 24). Включенню до реєстру таких об'єктів і їхній паспортизації підлягають також місця видалення відходів, а саме: дієві, закриті, законсервовані, постійні або тимчасові. Так, в останній період щороку в нашій державі збиралося від 10 до майже 12 млн т ППВ (без урахування тимчасово окупованих територій у Донецькій та Луганській областях та Автономної Республіки Крим і м. Севастополь) (Відходи, 2021; Стан..., 2021) (рис. 1). З них від 4,2 до 5,2 млн т видалалося на спеціально обладнані звалища (полігони). Проте, як і загалом у світі, на функціонально інших класах (або типах) об'єктів локалізації – несанкціонованих звалищах – відбувалося накопичення лівової частки відходів у країні, і насамперед – твердих побутових відходів (ТПВ). Ці два відмінних класи об'єктів видалення ТПВ відрізняються за низкою критеріїв, серед них ступінь інженерного облаштування геологічного середовища (ГС), до якого вони депонуються, технологічна послідовність їх складування, наявність екологічно-моніторингового контролю за їх експлуатацією тощо.

Постановка проблеми, цілі і задачі статті.

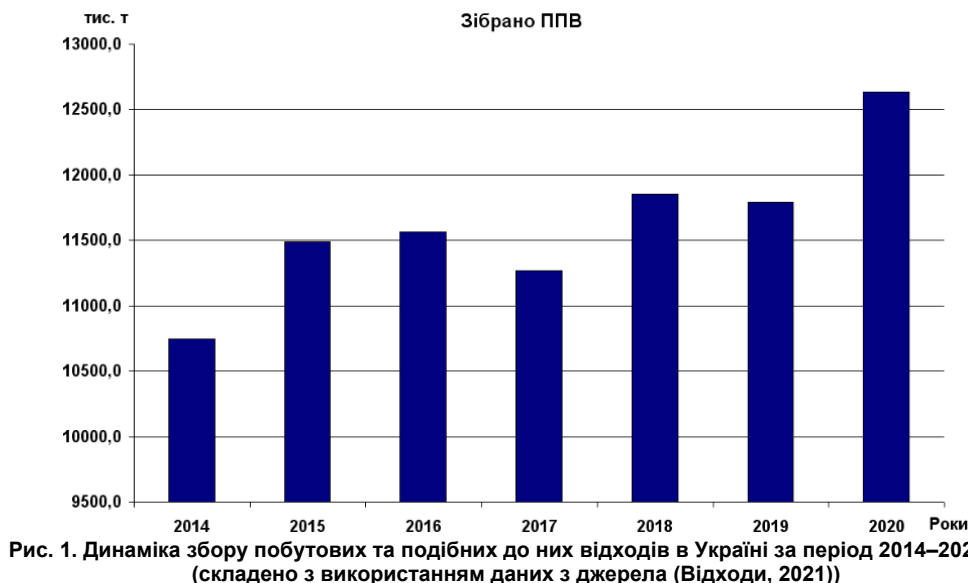
Отже, зважаючи на масштаби та динаміку накопичення ТПВ в Україні та в усьому світі, а також на комплекс пов'язаних з ними екологічних та соціоекономічних проблем у межах місць і районів їх локалізації на несанкціонованих звалищах і полігонах, охарактеризованих у численних публікаціях (Антошкіна та ін., 2003; Słomczyńska, Słomczyński, 2004; Mor et al., 2006; Oygard, Gjengedal, 2009; Шевченко, Медведєва, 2010; Adeolu et al., 2011; Щербина, 2012; Бондар та ін., 2013; Койнова, 2015; Новохацька, Крета, 2015; Azimov et al., 2018, 2019, a, c, 2020, d, e; Азімов та ін., 2019, b, 2020, a-c, f; Шевякіна та ін., 2019; Jimoh et al., 2019; Делеган-Кокайко та ін., 2020; Azimov, Shevchuk, 2020, a, b; Chen et al., 2020; Shevchuk et al., 2021 та ін.), **актуальною** є розробка та впровадження системи інформаційної підтримки поводження з об'єктами видалення муніципальних відходів. Система повинна забезпечувати апріорно й адекватно різномірною інформацією технологічного (про класи, проектні потужності звалищ, обсяги прийнятих ними відходів, про стан фільтрату та біогазу в їх межах тощо), геологічного (геоморфологія, будова четвертинних відкладів, гідролого-гідрогеологічні умови, неотектоніка та ін. характеристики районів складування ТПВ), екологічного (щодо забруднення компонентів довкілля токсикантами, пов'язаними з відходами), соціологічного (розташування звалищ стосовно населених пунктів, пасовищ, сільськогосподарських угідь і т. ін.) змісту різної масштабною ієрархії відповідні органи управління й господарювання національного, регіонального і місцевого рівня та їхні структурні підрозділи, що сприятиме забезпеченню сталого розвитку певних територій. Створення

© Азімов Олександр, Рогожин Олексій, Трофимчук Олександр, 2023

такої системи інформаційного забезпечення робіт щодо поводження з ТПВ (або геоінформаційної їх підтримки) слід розглядати як **загальну проблему**, на чому ми частково акцентували увагу в роботах (Trofymchuk et al., 2019; Azimov et al., 2021 та ін.).

У контексті зазначеного важливим є розв'язанням **частини** вказаної **проблеми**: розроблення концепції, розбудова і запровадження методичного комплексу інформаційного забезпечення досліджень і робіт стосовно поводження з ГС, що являє собою природний субстрат, у якому ТПВ й локалізуються. Отож, у статті зосередимо увагу передусім на об'єктному

ретроспективно-статичному і еколого-геологічному аналізі моделей об'єктів потенційної локалізації муніципальних відходів, які є своєрідними природно-антропогенними (природно-техногенними) утвореннями. Тобто розглянемо райони накопичення відходів у цьому аспекті на локальному масштабному рівні (на рівні так званого інфогеофрейму, на чому ми зупинимося нижче), що визначає **мету статті**. Водночас її основне **завдання** вбачаємо у характеристиці палеорекоконструктивної та прогностичної функцій моделей ГС для двох різновидних класів об'єктів видалення ТПВ: полігонів захоронення і несанкціонованих звалищ.



Логічним виглядає, щоб комплекс інформаційного забезпечення діяльності щодо поводження з ГС насамперед реалізовувати на прикладі полігонів захоронення відходів, як вже постійних об'єктів відносно великого просторового масштабу (геометричні параметри – площа, об'єм, загальна товщина шару накопичених відходів; глибина проникнення пов'язаних з ними екологічно небезпечних речовин тощо) і вже певною мірою вивчених з використанням різних методів і технологій. Адаптація комплексу має враховувати ландшафтно-геологічні умови конкретного полігона.

Характеристика об'єктів локалізації ТПВ. Методологічно і методично підходи до поводження з названими об'єктами двох класів відрізняються. Так, на **несанкціонованих звалищах** усі процеси практично відбуваються стихійно, не контролюються. Натомість на офіційно зареєстрованих, інженерно облаштованих **полігонах** послідовність захоронення, зберігання ТПВ та пов'язані з ними процеси зазвичай відбуваються таким чином:

1) Відходи завозять на полігон спеціальний транспорт. Усі без винятку транспортні засоби проходять зважування та перевірку на радіологічну безпеку на ваговій. Потім відходи потрапляють на робочу карту (чергу, майданчик), де їх розвантажують.

2) Відходи карти пакують на ній важкі бульдозери та ущільнюють спеціальні компактори. Шари відходів пересяпаються інертним ґрунтом.

3) Під час розкладання відходів утворюються фільтрат та біогаз (Mor et al., 2006; Adeolu et al., 2011 та ін.).

4) **Фільтрат** просочується в нижню частину карти, потрапляє у дренажну систему та відкачується насосною станцією в очисні споруди. У цих спорудах до 80 %

фільтрату очищується до чистої води та зливається в доквілля. Залишкові 20 % неочищеного концентрату перекачуються у відстійник та в тіло полігона.

5) **Біогаз** із відходів відкачується з карт полігону, проходить спеціальну підготовку і подається у біогазові поршневі двигуни, які приводять у рух електрогенератори (усі процеси відбуваються на території полігону). Далі електрична енергія подається в загальну енергосистему (здебільшого за зеленим тарифом).

Полігони й звалища відходів, виконуючи роль природоохоронних споруд шляхом захоронення та біодеградації, самі є джерелами **негативного впливу на довкілля**, які тим самим становлять загрозу для здоров'я людей, особливо тих, що проживають поряд з об'єктами локалізації ТПВ (Койнова, 2015; Делеган-Кокайко та ін., 2020 та ін.). До негативних видів впливу слід віднести виведення значних земельних площ із господарського використання на довгостроковий термін, забруднення ґрунтів та порушення їх структури, забруднення поверхневих, ґрунтових і підземних вод, забруднення рослинного покриву, атмосферного повітря, підвищена пожежонебезпечність тощо (Mor et al., 2006; Adeolu et al., 2011; Azimov et al., 2018, 2019, a, c, 2020, d, e; Azimov та ін., 2019, b, 2020, a-c, f; Azimov, Shevchuk, 2020, a та ін.).

На підставі аналізу впливу звалищ і полігонів захоронення ТПВ на довкілля виділяють (Щербина, 2012) такі **види забруднення**: фізичне, теплове, хімічне, мікробіологічне, а в деяких випадках – радіоактивне. Фізичне забруднення зумовлене можливістю засмічення довколишньої території відходами і пилом, теплове – зміною теплового режиму ГС у результаті підвищення температури в товщі відходів, хімічне – надходженням до довкілля хімічних

сполук. Бактерійне забруднення пов'язане з розвитком патогенних організмів.

У товщі ТПВ відбуваються процеси біохімічного розкладання органічної складової ТПВ, які можна порівняти з роботою "біологічного реактора". Унаслідок цих процесів утворюються біогаз і фільтрат, що містять токсичні компоненти. У зв'язку з тим, що компонентний склад ТПВ ускладнюється, а також із тим, що відповідно до чинних нормативних документів на полігони ТПВ допускається вивозити промислові відходи III і IV класів небезпеки, токсичність фільтрату зростає, у ньому з'являються компоненти, які раніше були відсутні. Масоперенесення шкідливих речовин, що утворюються в місцях розміщення відходів, відбувається шляхом взаємодії залежних і незалежних один від одного елементів екосистеми (Щербина, 2012).

Методологія поводження з об'єктами локалізації ТПВ. Підсумовуючи викладене, можна стверджувати, що методологічна сутність об'єктів локалізації ТПВ може формулюватися як *природно-техно(антропо)генна система*. Ця система включає певну масу відходів і являє собою дієве або потенційне джерело надходження небезпечних (зокрема, токсичних) забруднювачів до довкілля (у тому числі – до ГС). Якщо в певній автономності від інших геосфер розглядати літосферу та її взаємодію з місцями розміщення ТПВ, тоді маємо *техно(антропо)генно-геологічну підсистему* в рамках природно-техно(антропо)генної системи загалом. За визначенням (Хрущов и др., 2019) техногенно-геологічна (під)система – частина ГС, що вміщує техногенні об'єкти; вона обмежується межами зон впливу геологічної діяльності.

Для *полігонів захоронення* природно-техногенна система включає три функціональні елементи: масу ТПВ, інженерні бар'єри і компоненти навколишнього природного середовища, до складу якого входить і ГС. Тобто в цьому випадку система володіє природними та інженерними бар'єрами і функціонує на основі принципу необхідного і достатнього ступеня ізоляції різними геосферами (насамперед геологічним середовищем) виходу небезпечних забруднювачів за межі об'єкта захоронення.

Натомість для *несанкціонованих звалищ*, що накопичують ТПВ, антропогенно-геологічна (під)система охоплює лише два основні функціональні елементи: масу ТПВ і ГС, що їх вміщує. Функціонування її полягає в постійному надходженні забруднювачів, що містяться у фільтраті, до ГС. Водночас здебільшого природно-техногенна система загалом існує в умовах послідовного зростання загальної маси ТПВ.

Отже, полігони захоронення і звалища ТПВ і відповідні їм техногенно-геологічні (під)системи володіють відмінними функціональними властивостями і являють собою функціональні моделі об'єктів різних класів. За цих обставин виходимо із загального визначення, що *модель геологічного (техногенно-геологічного) об'єкта* – це формальне, адекватне його відображення (аналогове, цифрове), що зберігає певну частину його властивостей, ознак, характеристик, яке створюється з метою його пізнання, дослідження і спрямування управлінських щодо нього дій. Звідси *функціональна модель* техногенно-геологічного об'єкта – це формальне адекватне його відображення, що включає його структурні й якісні (або його структурних елементів) властивості, які визначають можливість дій із поводження з ГС як його складовим функціональним елементом.

Загалом об'єкти двох класів локалізації ТПВ (звалища і полігони) належать до типу *інфогеофреймів за призначенням*, а в межах цього типу – до групи цільових інфогеофреймів (згідно з класифікацією за працю

(Khrushchov et al., 2020)). У випадку ізоляції ТПВ у ГС, що розглядається, *інфогеофрейм* – це геоінформаційне структурно-речовинне прогнозно-ретроспективно-статичне відображення (образ) певного класу геологічних об'єктів (або конкретного геологічного об'єкта), яке може використовуватися для цільового дослідження і (або) проведення дій з поводження з ГС.

Звалища і полігони захоронення ТПВ як класи об'єктів, що розрізняються, у свою чергу вимагають розробки і застосування різних методик (гео)інформаційного забезпечення різного роду діяльності як у їх межах, так і на прилеглих до них територіях.

Методика інформаційного забезпечення робіт на об'єктах локалізації ТПВ. Зважаючи на теоретичні розробки (Хрущов и др., 2019; Khrushchov et al., 2019; Azimov et al., 2021), методичний комплекс інформаційного забезпечення досліджень і робіт з поводження з геологічним середовищем, як субстратом локалізації ТПВ, повинен включати два блоки:

- створення прогнозно-палеореконструктивної ретроспективно-статичної моделі ГС;
- створення комплексної еколого-геологічної моделі техногенно-геологічного об'єкта.

Створюючи *прогнозно-(палео)реконструктивну модель геологічного середовища*, мають на увазі дві функції моделювання: – прогнозну і реконструктивну. *Прогнозна функція* моделювання охоплює три аспекти:

- прогнозування перспективних для локалізації ТПВ геологічних об'єктів (різної предметності, в різних масштабах);
- прогнозування функціональних властивостей ГС у межах локальних об'єктів ізоляції ТПВ;
- прогнозування розвитку геологічних процесів у часі в межах локальних об'єктів ізоляції ТПВ.

Реконструктивна функція моделювання ГС у районах, перспективних для ізоляції ТПВ, має на увазі встановлення структурних і літологічних (петрофізичних) (а відповідно і функціональних) характеристик геологічних об'єктів (різних масштабно-формаційних рангів), як головного завдання цільового статичного моделювання, і водночас – як параметрів до інструменту для встановлення геологічних процесів сучасності й реконструкції їх у минулому.

Комплексна еколого-геологічна модель техногенно-геологічного об'єкта локалізації ТПВ – це цільова модель високого порядку, яка може складатися декількома предметними моделями підпорядкованих рангів, що базуються на структурно-літолого-петрофізичній моделі ГС як матричній. Склад комплексу предметних моделей визначається предметом (системою заходів) поводження з наміченим геологічним об'єктом. За аналогією з об'єктами ізоляції радіоактивних відходів (сховищ геологічного типу) (Хрущов и др., 1993 та ін.) у складі теоретичної комплексної еколого-геологічної моделі ГС для розміщення об'єктів локалізації ТПВ беруть участь сім основних предметних моделей: структурно-тектонічна, літологічна (або петрологічна), геомеханічна і інженерно-геологічна, геохімічна, теплофізична, гідрогеологічна (гідродинамічна, гідрохімічна) і гідрогеологічна міграційна.

Отже, основним робочим інструментом інформаційного забезпечення дій з поводження з об'єктами локалізації ТПВ у ГС є надання *інформаційних моделей* конкретних інфогеофреймів. Зміст таких моделей (еколого-геологічних моделей) визначається цілями і завданнями поводження з референтним класом

об'єктів (абстрактним інфогеофреймом). Виходячи з таких передумов, цілі й завдання інформаційного моделювання для полігонів захоронення і звалищ ТПВ різняться. Так, для *полігонів захоронення ТПВ метою моделювання є забезпечення екологічної безпеки функціонування техногенно-геологічної підсистеми, включаючи стадію функціонування об'єкта після його закриття і рекультивації* (з довгостроковою оцінкою безпеки). *Завдання* вбачаються такі: обґрунтування системи геомоніторингу техногенно-геологічного об'єкта; розробка цільової комплексної еколого-геологічної його моделі та її експлуатація як постійної (в умовах розширення, укрупнення, реконструкції, ліквідації, рекультивації тощо).

Для *несанкціонованих звалищ* і районів накопичення ТПВ *мета інформаційного моделювання* полягає в забезпеченні безпеки комплексу заходів щодо поводження з ними, а *завдання* – в обґрунтуванні й виборі передусім технічних рішень з поводження із цими об'єктами (стабілізація на місці, ліквідація і т. ін.).

Як бачимо, для обох класів локалізації ТПВ комплексна еколого-геологічна модель має ідентичну структуру, що включає підпорядковані підмоделі: цифрову структурно-літологічну (структурно-петрологічну), що є матричною для всіх інших побудов; гідрогеологічну (гідродинамічну і гідрохімічну), міграційну (для екологічно небезпечних елементів і сполук); інженерно-геологічну та ін. Проте зміст цих моделей відрізняється відповідно до завдань проектування. Виходячи з результатів моделювання, виконується аналіз безпеки – поточної для запланованих заходів і довгострокової для об'єктів захоронення ТПВ (полігонів), що проектується.

Отже, враховуючи і узагальнюючи вищевикладене, можна визначити об'єми інфогеофреймів для моделювання конкретних об'єктів з числа двох класів локалізації ТПВ:

- для полігонів захоронення ТПВ:
 - тіло власне сховища відходів (карта, черга, майданчик полігону) з існуючими інженерними бар'єрами;
 - ближня до нього зона вмісного ГС, що зазнає безпосереднього впливу сховища за штатного режиму його функціонування;
- для несанкціонованих об'єктів локалізації відходів:
 - маса ТПВ у звалищі;
 - зона виходу фільтратів до ГС (установлюється під час створення системи геомоніторингу).

В обох випадках, як для полігонів, так і для звалищ ТПВ, одним із важливих інструментів їх моніторингу поряд з дослідженнями по регулярній мережі наземного опробування (літо-, гідро- і біогеохімічного) є застосування геоінформаційних технологій, що включають методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) (рис. 2). Позитивні результати їх впровадження в різних країнах світу відображено в ряді публікацій (Ahmed et al., 2006; Кохан, Москаленко, 2009; Iacoboaia and Petrescu, 2013; Новохацька, Трофимчук, 2014; Demesouka et al., 2014; Khan and Samadder, 2014; Новохацька, Крета, 2015; Deblina and Goel, 2017; Azimov et al., 2018, 2019, a, b, 2020, d, e; Шевякіна та ін., 2019; Jimoh et al., 2019; Mussa and Suryabhagavan, 2019; Singh, 2019; Trofymchuk et al., 2019; Азімов та ін., 2020, c, f; Asefi et al., 2020; Azimov and Shevchuk, 2020, a, b; Shevchuk et al., 2021 та ін.).

Приклад. Як приклад деяких складових рис *інфогеофрейма* техногенно-геологічного об'єкта захоронення ТПВ наведемо дані по *Київському полігону № 5* загальною площею 63,7 га. Він складається з двох карт складування ("А" та "Б") і допоміжної інфраструктури: дренажної системи, дамб, насосних станцій,

водоочисної системи, відстійника фільтрату, системи відкачування біогазу. Принципіальний схематичний розріз однієї з карт полігону представлено на рис. 3.



Рис. 2. Перспективне дистанційне зображення північно-західної частини Київського полігону захоронення ТПВ № 5, зроблене з безпілотного літального апарата 31.05.2019 р., на якому простежуються місця височування фільтрату (чорно-коричневий копір) з "тіла" сміттєзвалища (карта "А"), стікання його по схилу і накопичення у його підніжжі



Рис. 3. Принциповий схематичний розріз карти полігону захоронення ТПВ

Власне *місцезолення* полігону приурочене до краю вододільного пасма (підняття), яке за *геоморфологічним районуванням* (Національний..., 2007) належить до Київського акумулятивно-денудаційно-хвилястого, середньо- та сильнорозчленованого плато на палеогенових (Р) і неогенових (N) відкладах. ТПВ на об'єкті складаються в межах колишніх, заповнених ними двох лівих приток (ярів субмеридіонального спрямування) Ходосівської балки урочища Марусин Яр. У районі полігону фонними є темно-сірі підзолисті *ґрунти*, що за своїми ознаками близькі до чорноземів типових, які переважно сформувалися на лесових відкладах бузького часу (Національний..., 2007).

Загальний *об'єм накопичених ТПВ* на полігоні перевищує 35 млн м³, їх маса – близько 7 млн т. Хоча за

первинним проєктом з дотриманням умов безпеки він міг прийняти 19,1 млн м³ відходів. Перевищення потужностей полігона разом з випадками нерегулярної роботи установи з переробки фільтрату призвело до значних *техногенних змін* ґрунтових утворень, поверхневих вод і ґрунтових вод неглибокого залягання, до змін рослинних угруповань як власне на об'єкті захоронення ТПВ, так і на прилеглих до нього ділянках (Azimov et al., 2018, 2019, a, c, 2020, d, e; Azimov та ін., 2019, b, 2020, a–c, f; Azimov, Shevchuk, 2020, a та ін.).

Зазначені особливості полігона були враховані під час проведення досліджень, результати яких викладені в наведених публікаціях.

Впровадження науково-технічних результатів. Запропоновану концепцію методики геоінформаційного забезпечення досліджень і робіт на об'єктах локалізації ТПВ впроваджено в науково-педагогічний процес Навчально-наукового інституту (ННІ) екобезпеки та управління Державного закладу "Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління" Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України (Акт впровадження-приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок від 02.11.2021 р.). Відповідна "Методична рекомендація стосовно запровадження комплексу геоінформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з геологічним середовищем, як субстратом локалізації твердих побутових відходів" використовуватиметься ННІ екобезпеки та управління під час виконання заходів з формування ресурсоефективних технологій на етапах розвитку стратегічного потенціалу екологічної безпеки та побудові інтегрованої системи управління екологічною безпекою за допомогою технологій географічних інформаційних систем із застосуванням космічних засобів ДЗЗ, а також як інформативний матеріал у процесі популяризації екологічної освіти під час переходу до системи інтегрованого управління природоохоронною складовою в галузі економіки. Це визначає *практичне значення* авторського доробку.

Висновки

Отже, запропонований у роботі методичний комплекс інформаційного забезпечення досліджень і робіт з поводження з ГС, як субстратом локалізації ТПВ, є актуальним. Це аргументується тим, що переважна частина відходів цього типу в Україні не переробляється, а ізолюється саме на несанкціонованих звалищах та полігонах. Комплекс включає два блоки: створення прогностно-палеорекоструктивної ретроспективно-статичної моделі ГС і створення комплексної еколого-геологічної моделі техногенно-геологічного об'єкта. Основним робочим інструментом комплексу є надання інформаційно-функціональних моделей конкретних об'єктів локалізації ТПВ (або інфогеофреймів).

Представлено демонстрацію наповнення деякими даними для ефективного геоінформаційного моделювання одного з найвивченіших полігонів захоронення ТПВ, розташованого в межах міської агломерації м. Києва. Надалі отримана модель становитиме базу для досліджень і робіт, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки об'єкта.

Комплекс геоінформаційного забезпечення, підібний до охарактеризованого, *рекомендується* впроваджувати у процес досліджень і робіт з поводження з ГС, насамперед, на територіях найбільших в Україні полігонів захоронення твердих муніципальних відходів. Водночас під час розробки і застосування комплексу необхідно враховувати конкретні ландшафтно-геологічні умови кожного з полігонів. Для з'ясування механізму міграції

забруднювачів у компонентах довкілля (ґрунти–природні води–рослинність) полігонів та прилеглих до них ділянок разом з моніторинговими наземними геолого-екологічними дослідженнями обов'язково потрібно проводити аналогічні дослідження за даними ДЗЗ. Для аналізу просторово розподіленої різномірної інформації необхідно використовувати сучасні технології географічних інформаційних систем.

Для більш повного охоплення за площею територій полігонів і прилеглих районів потрібно підбирати й отримувати зроблені субсинхронно з наземними дослідженнями інформативні (просторове, спектральне, радіометричне розрізнення) матеріали багатозональних космічних знімків, виконувати гіперспектральні зйомки з бортів безпілотних літальних апаратів по достатній кількості профілів і точок спостережень. Отримані таким чином гетерогенні дані у перспективі є сенс інтегрально обробити, застосовуючи відповідне програмне забезпечення.

Отже, своєчасне впровадження комплексу геоінформаційного забезпечення різноманітних робіт з поводження з ГС, як субстратом ізоляції ТПВ, підвищить загальну результативність досліджень з вибору районів, ділянок і локальних площ, потенційно сприятливих для розміщення в їхніх межах об'єктів захоронення відходів на початковому етапі їх проєктування. Також залучення комплексу на наступних стадіях "життя" полігонів підвищить ефективність їх подальшої експлуатації та рекультивації, допоможе мінімізувати ризики виникнення надзвичайних ситуацій, що можуть бути з ними пов'язані, та відповідні фінансово-матеріальні збитки.

Подальший розвиток напряму інформаційного моделювання розглянутої сфери вбачається у двох аспектах: інтенсивному – удосконалення методології і методів на основі інфогеологічних підходів, та екстенсивному – поширення пропонованої розробки на інші об'єкти локалізації ТПВ.

У стратегічному плані слід мати на увазі, що видалення ТПВ до сховищ приповерхневого типу (landfill) є лише альтернативою порівняно із стратегіями розвинених країн світової спільноти, орієнтованих на утилізацію і ліквідацію відходів. Проте реалістичний аналіз сучасної енергетичної забезпеченості України підтверджує правомірність цієї альтернативи на найближчі десятиліття.

Список використаних джерел

- Азімов, О.Т., Кураєва, І.В., Бахмутов, В.Г., Войтюк, Ю.Ю., Кармазиненко, С.П. (2019b). Оцінка розподілу важких металів у ґрунтах районів захоронення твердих побутових відходів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(87), 76–80. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.87.11>
- Азімов, О., Кураєва, І., Трофимчук, О., Злобіна, К., Кармазиненко, С. (2020b). Моніторингова оцінка якості поверхневих вод у районах захоронення твердих побутових відходів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(91), 56–60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08>
- Азімов, О.Т., Кураєва, І.В., Трофимчук, О.М., Кармазиненко, С.П., Злобіна, К.С. (2020a). Забруднення ґрунтів та інших об'єктів довкілля важкими металами в районах полігонів захоронення твердих побутових відходів. *Геоінформатика*, 1 (73), 82–98. http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2020_1_9
- Азімов, О.Т., Трофимчук, О.М., Злобіна, К.С., Кураєва, І.В., Кармазиненко, С.П. (2020f). Геохімія важких металів у ґрунтах сміттєзвалищ за результатами екологічних досліджень з використанням даних дистанційних знімків. *Геоінформатика*, 3 (75), 63–82. http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2020_3_5
- Азімов, О.Т., Шевчук, О.В., Азімова, К.О. (2020c). Геоінформаційні системи в дослідженнях чинників забруднення довкілля територій сміттєзвалищ: стан та перспективи. *Геоінформатика*, 2(74), 69–88. <http://www.geology.com.ua/UK/8114-2/>
- Антошкіна, Л.І., Коренюк, Є.Д., Хрущ, В.К., Беляев, М.М. (2003). Стан довкілля: моделі та прогноз. Наука і освіта.
- Бондар, О.І., Клімчук, Б.П., Коледінський, М.І., Мольчак, Я.О. (2013). Довкілля в умовах впливу сміттєзвалищ. РВВ ЛНТУ.

- Відходи. (2021). Статистична інформація. Економічна статистика / Навколишнє природне середовище. Київ: Державна служба статистики України. <http://www.ukrstat.gov.ua/>
- Делеган-Кохайко, С.В., Слабкий, Г.О., Лук'янова, В.В., Анпілова, Є.С. (2020). Вплив сміттєзвалищ на показники захворюваності сільського населення та поширеності серед нього хвороб. *Екологічна безпека та природокористування*, 2(34), 43–52. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.43-52>
- Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища". (1991). Закон від 25.06.1991 р. № 1264-XII. *Відомості Верховної Ради України*, 41, 546.
- Койнова, І.Б. (2015). Геоекологічні наслідки роботи комунального господарства в басейні річки Західний Буг. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*, 3–4 (24), 96–102. <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/5562/5117>
- Кохан, С.С., Москаленко, А.А. (2009). Оцінка можливості ідентифікації звалищ за багатоспектральними космічними знімками. *Вісник геодезії та картографії*, 6(63), 29–34.
- Національний атлас України. (2007). Гол. ред. Руденко, Л.Г. ДНВП "Картографія".
- Новохацька, Н.А., Крета, Д.П. (2015). Моделювання та прогнозування впливу сміттєзвалищ на підземні води. *Екологічні науки: наук.-практ. журн.*, 1(7), 71–79. <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2015/7/8.pdf>
- Новохацька, Н.А., Трофимчук, О.М. (2014). Технологія інвентаризації місць видалення відходів методами дистанційного зондування Землі. *Екологічна безпека та природокористування*, 14, 31–40.
- Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2020 рік. (2021). Київ: Мінрегіон України. <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teritory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vidhodamy-v-ukrayini-za-2020-rik-2/>
- Хрущов, Д.П., Лялько, В.І., Харитонов, О.М. і др. (1993). Изоляция радиоактивных отходов в геологических формациях (геолого-теплогидрофизическая часть). Препр. 93-3. Ин-т геол. наук АН Украины.
- Хрущов, Д.П., Ремезова, Е.А., Белевцев, Р.Я., Яковлев, Е.А., Азимов, А.Т., Иванова, А.В., Лобасов, А.П., Босевская, Л.П., Греку, Р.Х., Охолина, Т.В. (2019). Формационные алгоритмы теории информационного обеспечения исследований и работ по обращению с геологической средой. *Геоинформатика*, 1(69), 70–90. <http://www.geology.com.ua/ru/7673-2/>
- Шевченко, М., Медведева, О.В. (2010). Екологічна оцінка впливу полігонів твердих побутових відходів Кіровоградської області на стан навколишнього середовища. *Наукові записки КДПУ ім. В. Винниченка*, 10(II), 313–315. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream/123456789/5425/1/68.pdf>
- Шевякіна, Н.А., Трофимчук, О.М., Красовський, Г.Я., Клименко, В.І. (2019). Методи і моделі космічного моніторингу зон впливу полігонів твердих побутових відходів на довкілля. *Космічна наука і технологія*, 25, 1(116), 62–72. <https://doi.org/10.15407/knit2019.01.062>
- Щербина, Е.В. (2012). Методология анализа жизненного цикла при проектировании полигонов твердых бытовых отходов. *Урбанистика, строительство, экология: Консультации, рецензии, проекты, оценка специалистов*. <http://lerschtul.ru/ocology/metodologiya-analiza-zhiznennogo-cikla-pri-proektirovanii-poligonov-tyverdyx-bytovyx-otxodov.html>
- Adeolu, O.A., Ada, V.O., Gbenga, A.A., Adebayo, A.O. (2011). Assessment of groundwater contamination by leachate near a municipal solid waste landfill. *African Journal Environmental Science and Technology*, 5 (11), 933–940. doi: 10.5897/AJEST11.27
- Ahmed, Sh.M., Muhammad, H., Sivertun, A. (2006). Solid waste management planning using GIS and remote sensing technologies case study Aurangabad City, India. *Pap. 2006 International Conference on Advances in Space Technologies*, 2–3 September 2006, Islamabad, Pakistan, 196–200. doi: 10.1109/ICAST.2006.313826. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4106436>
- Asefi, H., Zhang, Ya., Lim, S., Maghrebi, M. (2020). An integrated approach to suitability assessment of municipal solid waste landfills in New South Wales, Australia. *Australasian Journal of Environmental Management*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/14486563.2020.179438>
- Azimov, O.T., Bakhmutov, V.G., Voytyuk, Yu.Yu., Dorofey, Ye.M., Karmazynenko, S.P., Kuraeva, I.V. (2018). Reconnaissance integrated geoeological study of the disposal region for municipal solid waste with the aim of environmental assessment. *Extended Abstr. 12th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine, 1–5. doi: 10.3997/2214-4609.201803142
- Azimov, O.T., Dorofey, Ye.M., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Zlobina, K.S., Karmazynenko, S.P. (2019a). Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. *Proc. 13th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 12–15 November 2019, Kyiv, Ukraine, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903228>
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Trofymchuk, O.M., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M., Voytyuk, Yu.Yu. (2019c). Estimation of the heavy metal pollution for the soils and different environmental objects within the solid domestic waste landfills. *Proc. 18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 13–16 May 2019, Kyiv, Ukraine, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902129>
- Azimov, O.T., Rogozhin, O.G., Trofymchuk, O.M., Khrushchov, D.P. (2021). Geoinformation support for the management of the localization objects of municipal solid waste. *Proc. 20th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–14 May 2021, Kyiv, Ukraine, 1–8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521169>
- Azimov, O.T., Shevchuk, O.V. (2020a). Geoinformation systems in monitoring studies of environmental pollution factors in the areas of municipal solid waste landfills. *Proc. 19th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo111>
- Azimov, O., Shevchuk, O. (2020b). Modeling and forecasting the impact of solid waste landfill on groundwater (the landfill in Zdolbuniv district of Rivne region, Ukraine, as an example). *Proc. 14th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 10–13 November 2020, Kyiv, Ukraine, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056078>
- Azimov, O.T., Shevchuk, O.V., Azimova, K.O., Dorofey, Ye.M., Tomchenko, O.V. (2020d). Integration of GIS and RSE aiming to the effective monitoring of the surroundings of landfills. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 27, 4–12. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.27.183>
- Azimov, O.T., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Zlobina, K.S., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M. (2020e). Ecological and geochemical study of the state of soil deposits in the impact areas of municipal solid waste landfills. *Proc. 19th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo133>
- Chen, D.M.C., Bodirsky, B.L., Krueger, T., Mishra, A., Popp, A. (2020). The world's growing municipal solid waste: trends and impacts. *Environmental Research Letters (ERL)*, 15 074021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8659/pdf>
- Deblina, D., Sudha, G. (2017). Applications of remote sensing and GIS in solid waste management – A review. In: Goel, S. (Ed.) *Advances in Solid and Hazardous Waste Management*. Cham: Springer, 133–151. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57076-1_7
- Demesouka, O.E., Vavatsikos, A.P., Anagnostopoulos, K.P. (2014). GIS-based multicriteria municipal solid waste landfill suitability analysis: A review of the methodologies performed and criteria implemented. *Waste Management and Research*, 32 (4), 270–296. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X14526632>
- Iacoboaia, C., Petrescu, F. (2013). Landfill monitoring using remote sensing: a case study of Glină, Romania. *Waste Management and Research*, 31 (10), 1075–1080. <https://doi.org/10.1177/0734242X13487585>
- Jimoh, R., Moradeyo, A., Chuma, V., Olubukola, O., Yusuf, A. (2019). GIS based appraisal of waste disposal for environmental assessment and management in Mainland area of Lagos state, NG. *International Journal of Environment and Geoinformatics (IJEGEO)*, 6 (1), 76–82. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.476449>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, Urban development Series. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- Khan, D., Samadder, S.R. (2014). Municipal solid waste management using Geographical Information System aided methods: A mini review. *Waste Management and Research*, 32(11), 1049–1062. <https://doi.org/10.1177/0734242X14554644>
- Khrushchov, D.P., Remezova, E.A., Azimov, O.T., Belevtsev, R.Ya., Yakovlev, E.A., Yaremenko, O.V. (2019). Formational basis of the theory for information support of geological activity. *Proc. 18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 13–16 May 2019, Kyiv, Ukraine, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902087>
- Khrushchov, D.P., Dolin, V.V., Goshovski, S.V., Remezova, O.O., Goncharov, V.Ye., Azimov, O.T., Shevchenko, O.L., Bolevska, L.P., Lobasov, O.P., Yaremenko, O.V. (2020). The theory of information providing for researches and works on geological environment management. *Proc. 19th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo012>
- Mor, S., Ravindra K., Dahiya, R.P., Chandra, A. (2006). Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental Monitoring and Assessment*, 118, 435–456. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1505-7>
- Mussa, A., Suryabagavan, K.V. (2019). Solid waste dumping site selection using GIS-based multi-criteria spatial modeling: a case study in Logia town, Afar region, Ethiopia. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1703311>
- Oygard, J.K., Gjengedal, E. (2009). Uranium in municipal solid waste landfill leachate. *International Journal Environmental Research (IJER)*, 3 (1), 61–68. Retrieved December 17, 2021, from https://ijer.ut.ac.ir/article_33.html
- Shevchuk, O.V., Azimov, O.T., Tomchenko, O.V. (2021). Remote sensing monitoring of the landfill sites as a factor of adverse environmental impact. *Proc. 20th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–14 May 2021, Kyiv, Ukraine, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>
- Singh, A. (2019). Remote sensing and GIS applications for municipal waste management. *Journal of Environmental Management*, 243, 22–29. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31077867/>. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.017.
- Stomczyńska, B., Stomczyński, T. (2004). Physico-chemical and toxicological characteristics of leachates from MSW landfills. *Polish Journal Environmental Studies*, 13 (6), 627–637. <https://pdfs.semanticscholar.org/f6cc/20d54e7074ad55439d5b468305c227fde101.pdf>

Trofymchuk, O., Rogozhin, O., Klymenko, V., Sheviakina, N., Kreta, D. (2019). Development the information-analytical system for assessing the impact of landfills on the environment and electronic management. *SGEM 2019 – Proc. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 9–12 December, 2019, Vienna, Austria*, 4.2, 65–72. <https://sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=6642>. doi: 10.5593/sgem2019V4.2/S05.009.

References

- Adeolu, O.A., Ada, V.O., Gbenga, A.A., Adebayo, A.O. (2011). Assessment of groundwater contamination by leachate near a municipal solid waste landfill. *African Journal Environmental Science & Technology*, 5(11), 933–940. doi: 10.5897/AJEST11.27
- Ahmed, Sh.M., Muhammad, H., Sivertun, A. (2006). Solid waste management planning using GIS and remote sensing technologies case study Aurangabad City, India. *Pap. 2006 International Conference on Advances in Space Technologies, 2–3 September 2006, Islamabad, Pakistan*, 196–200. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4106436>. doi: 10.1109/ICAST.2006.313826.
- Antoshkina, L.I., Korenyuk, Ye.D., Khrushch, V.K., Belyaev, M.M. (2003). State of environment: models and prognosis. Donetsk: Nauka i osvita.
- Asefi, H., Zhang, Ya., Lim, S., Maghrebi, M. (2020). An integrated approach to suitability assessment of municipal solid waste landfills in New South Wales, Australia. *Australasian Journal of Environmental Management*, 1–21. <https://doi.org/10.1080/14486563.2020.1719438>.
- Azimov, O.T., Bakhtmutov, V.G., Voytyuk, Yu.Yu., Dorofey, Ye.M., Karmazynenko, S.P., Kuraeva, I.V. (2018). Reconnaissance integrated geocological study of the disposal region for municipal solid waste with the aim of environmental assessment. *Extended Abstr. 12th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 13–16 November 2018, Kyiv, Ukraine*, 1–5. doi: 10.3997/2214-4609.201803142
- Azimov, O.T., Dorofey, Ye.M., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Zlobina, K.S., Karmazynenko, S.P. (2019a). Monitoring and assessment of impact of municipal solid waste landfills on the surface water quality in the adjacent ponds. *Proc. 13th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 12–15 November 2019, Kyiv, Ukraine*, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903228>
- Azimov, O., Kuraeva, I., Bakhtmutov, V., Voytyuk, Yu., Karmazynenko, S. (2019b). Assessment of the heavy metal distribution in soils within the areas for the municipal solid waste disposal. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(87), 76–80. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.87.11> [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Trofymchuk, O.M., Karmazynenko, S.P., Zlobina, K.S. (2020a). The heavy metal pollution for the soils and different environmental objects within the areas of municipal solid waste landfills. *Geoinformatics*, 1(73), 82–98. http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2020_1_9 [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Kuraeva, I.V., Trofymchuk, O.M., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M., Voytyuk, Yu.Yu. (2019c). Estimation of the heavy metal pollution for the soils and different environmental objects within the solid domestic waste landfills. *Proc. 18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 13–16 May 2019, Kyiv, Ukraine*, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902129>
- Azimov, O., Kuraeva, I., Trofymchuk, O., Zlobina, K., Karmazynenko, S. (2020b). Monitoring assessment of the surface water quality within the areas for the municipal solid waste disposal. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (91), 56–60. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.08> [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Rogozhin, O.G., Trofymchuk, O.M., Khrushchov, D.P. (2021). Geoinformation support for the management of the localization objects of municipal solid waste. *Proc. 20th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May 2021, Kyiv, Ukraine*, 1–8. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521169>
- Azimov, O.T., Shevchuk, O.V. (2020a). Geoinformation systems in monitoring studies of environmental pollution factors in the areas of municipal solid waste landfills. *Proc. 19th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine*, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo111>
- Azimov, O., Shevchuk, O. (2020b). Modeling and forecasting the impact of solid waste landfill on groundwater (the landfill in Zdolbuniv district of Rivne region, Ukraine, as an example). *Proc. 14th International Scientific Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 10–13 November 2020, Kyiv, Ukraine*, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056078>
- Azimov, O.T., Shevchuk, O.V., Azimova, K.O. (2020c). Geoinformation systems in the investigations of the environment pollution drivers within the catchment areas of landfills: current state and trends. *Geoinformatics*, 2(74), 69–88. <http://www.geology.com.ua/en/8114-2/> [in Ukrainian].
- Azimov, O.T., Shevchuk, O.V., Azimova, K.O., Dorofey, Ye.M., Tomchenko, O.V. (2020d). Integration of GIS and RSE aiming to the effective monitoring of the surroundings of landfills. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 27, 4–12. <https://doi.org/10.36023/ujsr.2020.27.183>
- Azimov, O.T., Trofymchuk, O.M., Kuraeva, I.V., Zlobina, K.S., Karmazynenko, S.P., Dorofey, Ye.M. (2020e). Ecological and geochemical study of the state of soil deposits in the impact areas of municipal solid waste landfills. *Proc. 19th EAGE International Conference on Geoinformatics –*

Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo133>

Azimov, O.T., Trofymchuk, O.M., Zlobina, K.S., Kuraeva, I.V., Karmazynenko, S.P. (2020f). Heavy metals geochemistry in soil for the landfill sites on the results of environmental studies using remote sensing data. *Geoinformatics*, 3 (75), 63–82. http://nbuv.gov.ua/UJRN/geoinf_2020_3_5 [in Ukrainian].

Bondar, O.I., Klimchuk, B.P., Kolyadinsky, M.I., Molchak, Ya.O. (2013). Environment in the conditions of influence of garbage dumps. *RVV LNTU* [in Ukrainian].

Chen, D.M.C., Bodirsky, B.L., Krueger, T., Mishra, A., Popp, A. (2020). The world's growing municipal solid waste: trends and impacts. *Environmental Research Letters (ERL)*, 15 074021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab8659/pdf>

Deblina, D., Sudha, G. (2017). Applications of remote sensing and GIS in solid waste management – A review. In: Goel, S. (Ed.) *Advances in Solid and Hazardous Waste Management*. Cham: Springer, 133–151. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57076-1_7

Delehan-Kokaiko, S., Slabkiy, G., Lukianova, V., Anpilova, Y. (2020). Effect of landfill sites on disease and disease distribution among rural population. *Environmental Safety & Natural Resources*, 2(34), 43–52. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.43-52> [in Ukrainian].

Demesouka, O.E., Vavatsikos, A.P., Anagnostopoulos, K.P. (2014). GIS-based multicriteria municipal solid waste landfill suitability analysis: A review of the methodologies performed and criteria implemented. *Waste Management & Research*, 32(4), 270–296. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X14526632>. doi: 10.1177/0734242X14526632.

Iacoboaia, C., Petrescu, F. (2013). Landfill monitoring using remote sensing: a case study of Glină, Romania. *Waste Management & Research*, 31(10), 1075–1080. <https://doi.org/10.1177/0734242X13487585>

Jimoh, R., Moradeyo, A., Chuma, V., Olubukola, O., Yusuf, A. (2019). GIS based appraisal of waste disposal for environmental assessment and management in Mainland area of Lagos state, NG. *International Journal of Environment & Geoinformatics (IJEGEO)*, 6(1), 76–82. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.476449>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: A global snapshot of solid waste management to 2050. Washington, DC: World Bank, Urban development Series. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>

Khan, D., Samadder, S.R. (2014). Municipal solid waste management using Geographical Information System aided methods: A mini review. *Waste Management & Research*, 32(11), 1049–1062. <https://doi.org/10.1177/0734242X14554644>

Khrushchov, D.P., Remezova, E.A., Azimov, O.T., Belevtsev, R.Ya., Yakovlev, E.A., Yaremenko, O.V. (2019). Formational basis of the theory for information support of geological activity. *Proc. 18th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 13–16 May 2019, Kyiv, Ukraine*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902087>

Khrushchov, D.P., Dolin, V.V., Goshovski, S.V., Remezova, O.O., Goncharov, V.Ye., Azimov, O.T., Shevchenko, O.L., Bosevska, L.P., Lobasov, O.P., Yaremenko, O.V. (2020). The theory of information providing for researches and works on geological environment management. *Proc. 19th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, 11–14 May 2020, Kyiv, Ukraine*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo012>

Khrushchov, D.P., Lialko, V.I., Kharitonov, O.M. et al. (1993). Isolation of radioactive wastes in the geological formations (geological-thermophysical part). Preprint 93-3. Kiev: Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Geological Sciences [in Russian].

Khrushchov, D.P., Remezova, E.A., Belevtsev, R.Ya., Yakovlev, E.A., Azimov, A.T., Ivanova, A.V., Lobasov, A.P., Bosevska, L.P., Greku, R.Kh., Okholina, T.V. (2019). Formation algorithms of information support for r&d on geological medium management. *Geoinformatics*, 1(69), 70–90. <http://www.geology.com.ua/ru/7673-2> [in Russian].

Koinova, I.B. (2015). Geocological consequences of the communal enterprises work within Western Bug river basin. *Man & Environment. Issues of Neocology*, 3–4(24), 96–102. <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/5562/5117> [in Ukrainian].

Kokhan, S.S., Moskalenko, A.A. (2009). Assessment of capability for the identification of landfills using multispectral satellite images. *Bulletin of Geodesy & Cartography*, 6(63), 29–34 [in Ukrainian].

Mor, S., Ravindra K., Dahiya, R.P., Chandra, A. (2006). Leachate characterization and assessment of groundwater pollution near municipal solid waste landfill site. *Environmental Monitoring & Assessment*, 118, 435–456. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-1505-7>

Mussa, A., Suryabhagavan, K.V. (2019). Solid waste dumping site selection using GIS-based multi-criteria spatial modeling: a case study in Logia town, Afar region, Ethiopia. *Geology, Ecology, & Landscapes*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1703311>

National atlas of Ukraine. (2007). Rudenko, L.G. (Ed.). Kyiv: SSPE "Kartographia" [in Ukrainian].

Novokhatska, N.A., Kreta, D.L. (2015). Modelling and forecasting the impact of landfills on groundwater. *Ecological Sciences: Scientific & Practical Journal*, 1(7), 71–79. <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2015/7/8.pdf> [in Ukrainian].

Novokhatska, N.A., Trofymchuk, O.M. (2014). Technology inventory waste deposits methods of remote sensing. *Environmental Safety & Natural Resources*, 14, 31–40 [in Ukrainian].

Oygard, J.K., Gjengedal, E. (2009). Uranium in municipal solid waste landfill leachate. *International Journal Environmental Research (IJER)*, 3(1), 61–68. https://ijer.ut.ac.ir/article_33.html

Shcherbina, E.V. (2012). Methodology of life cycle analysis in the design of municipal solid waste landfills. *Urban Science, Construction & Ecology: Consultation, Reviews, Projects & Expert Assessment*. <http://lerschtul.ru/ocolog/metodologiya-analiza-zhiznennogo-tsikla-pri-proektirovanii-poligonov-terdyx-bytovyx-otxodov.html> [in Russian].

Shevchenko, M., Medvedieva, O.V. (2010). Ecological evaluation of the impact of solid waste landfills on the state of environment. *Academic Notes of Kirovohrad Volodymyr Vynnychenko State Pedagogical University*, 10(II), 313–315. <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream/123456789/5425/1/68.pdf> [in Ukrainian].

Shevchuk, O.V., Azimov, O.T., Tomchenko, O.V. (2021). Remote sensing monitoring of the landfill sites as a factor of adverse environmental impact. *Proc. 20th EAGE International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, 11–14 May 2021, Kyiv, Ukraine, 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>

Sheviakina, N.A., Trofymchuk, O.M., Krasovsky, G.Y., Klimenko, V.I. (2019). Methods and models of space monitoring of zones of effect of solid domestic waste landfill on the environment. *Space Science & Technology*, 25(1, 116), 62–72. <https://doi.org/10.15407/knit2019.01.062> [in Ukrainian].

Singh, A. (2019). Remote sensing and GIS applications for municipal waste management. *Journal of Environmental Management*, 243, 22–29. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31077867/>. doi: 10.1016/j.jenvman.2019.05.017.

Ślomońska, B., Ślomoński, T. (2004). Physico-chemical and toxicological characteristics of leachates from MSW landfills. *Polish Journal Environmental Studies*, 13(6), 627–637. <https://pdfs.semanticscholar.org/f6cc/20d54e7074ad55439d5b468305c227fde101.pdf>

State of the municipal waste treatment sphere in Ukraine for 2020. (2021). Kyiv: Ministry for Communities & Territories Development of Ukraine. <https://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zhkh/teretory/stan-sfery-povodzhennya-z-pobutovymy-vi/> [in Ukrainian].

The Law of Ukraine "On Environmental Protection". (1991). Act of Ukraine No. 1264-XII, on June 25, 1991. *State Lists of Verkhovna Rada of Ukraine*, 41, 546 [in Ukrainian].

Trofymchuk, O., Rogozhin, Trofymchuk, O., Rogozhin, O., Klymenko, V., Sheviakina, N., Kreta, D. (2019). Development the information-analytical system for assessing the impact of landfills on the environment and electronic management. *SGEM 2019 – Proc. 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, 9–12 December, 2019, Vienna, Austria, 4.2, 65–72. <https://sgem.org/index.php/elibrary?view=publication&task=show&id=6642>. doi: 10.5593/sgem2019V/4.2/S05.009.

Waste. (2021). Statistical information. Economic statistics / Environment. Kyiv: State Statistics Service of Ukraine. <http://www.ukrstat.gov.ua/> [in Ukrainian].

Отримано редакцією журналу / Received: 14.09.22

Прорецензовано / Revised: 15.05.23

Схвалено до друку / Accepted: 31.08.23

Oleksandr AZIMOV, DSc (Geol.), Senior Researcher

e-mail: azimov@casre.kiev.ua

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Oleksij ROGOZHIN, DSc (Econ.), Senior Researcher

e-mail: olexarog@gmail.com

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Oleksandr TROFYMCHUK, DSc (Tech.), Prof., Corresponding Member of NAS of Ukraine

e-mail: Trofymchuk@nas.gov.ua

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A CONCEPTUAL APPROACH TO THE CREATION OF AN INFORMATION SUPPORT SYSTEM FOR THE WORKS RELATED TO THE MANAGEMENT OF THE GEOLOGICAL ENVIRONMENT IN THE CONTEXT OF THE LOCALIZATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE

The article considers the recent world approaches to municipal solid waste (MSW) management, describes two classes of the objects for their localization such as the unauthorized dumps and disposal landfills which play different functional roles in waste management. Together with the host and surrounding components of the environment the landfills and the dumps are represented as a special environmental-techno(anthro)genic system. Since the waste itself is deposited into the geological environment (GE), within the framework of this system in a whole, the technogenic-geological subsystem is considered, which can be represented by certain functional model or an infoframe for specified application (i.e. target-oriented).

Conceptually, a methodical complex of information support is proposed for the researches and works on the management of GE, where MSW is located. This complex should include two blocks: a prognostic-retrospective-static model for the GE and an integrated ecological-geological model for the technogenic-geological object. Therefore, the main service tool of the information support for the MSW management of the objects of localization in the GE is a provision of the information-functional models for the certain infoframes. Completeness of these ecological-geological models is specified by the goals and problems of the management of reference class of the objects (an abstract infoframe). An illustration of the filling the information model by some data and its implementation into the Kyiv's Landfill area No 5 is present.

The main directions of further research are outlined.

Keywords: municipal solid waste, dumps, landfills, technogenic-geological subsystem, information support for the management.

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(102)

Відповідальний за випуск Олександр Меньшов
Chief publication manager O. Menshov

Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова
Computer processing of the articles by O. Kozionova

Редактор І. Нечаєва

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. 11,9. Наклад 300. Зам. № 223-10788.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № ГлЗ.
Підписано до друку 01.09.23

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 58; тел./факс (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