

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science (квартиль 4), Academic Resource Index Research Bib та Google Scholar. Категорія А Міністерства освіти і науки України.

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Journal is indexed in Web of Science (Quartile 4), Academic Resource Index Research Bib and Google Scholar. Rank A of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Відповідальний за випуск О. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ	С. Вижва, д-р геол. наук, проф. О. Шабатура, д-р геол. наук, доц. (заст. головн. ред.); О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. дослідник (відп. ред.); Г. Артеменко, д-р геол. наук, проф.; В. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; З. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. Дубина, д-р геол. наук, доц.; В. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; І. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; В. Михайлов, д-р геол. наук, проф.; Г. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т. Мірончук, канд. філол. наук, доц. Іноземні члени редакційної колегії: А. Веснавер, Італійський національний інститут океанографії та прикладної геофізики, Італія; Т. Діндароглу, Університет Кахраманмарас Сутцу Імам, Туреччина; А. Ель Албані, Університет Пуатьє, Франція; К. Зенг, Китайський геологічний університет, Китай; О. Івахненко, Казахстансько-Британський технічний університет, Казахстан; А. Коронеос, Університет Арістотеля в Салоніках, Греція; К. Лі, Китайський геологічний університет, Китай; М. Олівія, Лісабонський університет, Португалія; П. Перейра, Університет Миколаса Ромеріса, Литва; В. Портнов, Карагандинський державний технічний університет, Казахстан; С. Спассов, Геофізичний центр Доурбес, Бельгія; В. Шмідт, Університет Мюнстера, Німеччина
Адреса редколегії	ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна; ☎ (38044) 521 33 38; електронна адреса: geolvvisnyk@ukr.net; https://geology.bulletin.knu.ua/
Затверджено	Вченою радою ННІ "Інститут геології" 13 червня 2023 року (протокол № 12)
Атестовано	Вищою атестаційною комісією України. Постанова Президії ВАК України № 1-05/6 від 12.06.02
Зареєстровано	Міністерством юстиції України. Свідоцтво про Державну реєстрацію КВ № 25418-15358ПР від 03.02.23
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	6-р Тараса Шевченка, 14, Київ, 01601, Україна; ☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; факс 239 31 28

UDC 504+550+551+552+624

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Jornal is indexed in Web of Science (Quartile 4), Academic Resource Index Research Bib and Google Scholar. Rank A of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science (квартиль 4), Academic Resource Index Research Bib та Google Scholar. Категорія А Міністерства освіти і науки України.

Chief publication manager O. Menshov

**EDITOR-IN-CHIEF
EDITORIAL BOARD**

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.

Ukrainian Members:

O. Shabatura, Dr. Sci. (Geol.), Associate Prof. (Deputy Editor-in-Chief); O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher (Executive Editor); G. Artemenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; V. Bakhmutov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; O. Dubyna, Dr. Sci. (Geol.), Associate Prof.; V. Zagnitko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; V. Zacerkovniy, Dr. Sci. (Tech.), Prof.; O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; I. Korchagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; V. Lozitsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Mytrokhin, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; G. Milinevskiy, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; V. Nesterovskiy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; V. Ogar, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; M. Orliuk, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Shevchenko, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; V. Shevchuk, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; S. Shnyukov, Dr. Sci. (Geol.), Associate Prof.; T. Pastushenko, PhD (Philol.), Associate Prof.; T. Mironchuk, PhD. (Philol.), Associate Prof.

Foreign members:

T. Dindaroğlu, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Turkey; A. El Albani, Université de Poitiers, France; O. Ivakhnenko, Kazakh British Technical University, Kazakhstan; A. Koroneos, Aristotle University of Thessaloniki, Greece; Q. Liu, China University of Geosciences, China; M. Olivia, University of Lisbon, Portugal; P. Pereira, Mykolas Romeris University, Lithuania; V. Portnov, Karaganda State Technical University, Kazakhstan; V. Schmidt, Münster University, Germany; S. Spassov, Geophysical Center of Dourbes, Belgium; A. Vesnaver, Italian National Institute of Oceanography and Applied Geophysics, Italy; Q. Zeng, China University of Geosciences, China

Address

Institute of Geology, 90, Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
tel. (38044) 521 33 38; e-mail: geolvisnyk@ukr.net;
<https://geology.bulletin.knu.ua/>

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
June 13, 2023 (Minutes # 12)

Certified by the

Higher Attestation Board
(the State Commission for Academic Degrees and Titles), Ukraine
Edict # 1-05/6 issued on 12.06.02

Certified by the

Ministry of Justice of Ukraine
State Certificate # 25418-15358NP issued on 03.02.23

Founded and published by

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University",
State Certificate # 1103 issued on 31.10.02

Address

14, Taras Shevchenko blv., Kyiv, 01030, Ukraine;
☎ (38044) 239 32 22, 239 31 72; Fax 239 31 28

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Дернов В., Удовиченко М.

- Перша знахідка роду *Arcticocarcinus Schweitzer et al., 2016* (Decapoda, Brachyura)
у данському ярусі Криму (Україна) та її палеобіогеографічне значення5

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О.

- Електричні і пружні параметри ущільнених теригенних порід кембрію східного схилу
Львівського палеозойського прогину15

Лубков М.

- Моделювання зсувних деформацій під дією сили тяжіння25

Ільєнко В., Бурахович Т., Кушнір А.

- Інтерпретація 3D геоелектричної моделі району перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської зон розломів31

Краснікова О., Вижва С.

- Формування швидкісної моделі і теоретичні основи методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події
при проведенні гідророзриву пласта38

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

Саттар-заде Н., Імамвердієв Н.

- Особливості розподілу основних рудоутворювальних компонентів Філізчайського родовища
південного схилу Великого Кавказу43

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Вижва С., Курило М., Паюк С., Ткаченко Ю.

- Екологічні та соціальні ризики в міжнародних та вітчизняних системах оцінки мінеральних ресурсів51

Багрий І., Стародубець К., Малишев О., Глонь В.

- Вуглеводневий потенціал девонських відкладів Чернігівсько-Брагинського перспективного району57

Бучинська І., Матрофайло М., Побережський А.

- Комплексне освоєння супутніх корисних копалин і компонентів вугілля Любельського родовища
Львівсько-Волинського басейну62

Комлев О.

- Про зональність ільменітових розсипів Іршанського розсипного поля
Української субпровінції розсипної провінції Східної Європи68

Баряцька Н., Сергєєв С.

- Використання контрольних проб для забезпечення і контролю якості (QA/QC)75

Верховцев В., Суцук К., Тишенко Ю., Мещеряков С., Колябіна І.

- Екологічні аспекти добування урану способом підземного свердловинного вилуговування
(на прикладі Михайлівського полігенного родовища)81

Майборода Є., Курило М.

- Промислові типи родовищ карбонатної сировини та їхні параметри кондицій для підрахунку запасів88

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Тютюнник Ю., Шабатура О., Блюм О.

- Біогеохімічне ліхеноіндикаційне вивчення стану
та динаміки атмосферного забруднення дендропарку "Асканія-Нова"94

Ромашенко М., Богаєнко В., Сардак А., Никитюк О.

- Визначення параметрів систем підґрунтового краплинного зрошення
на основі математичного моделювання вологоперенесення103

Люта Н.

- Сучасний стан і перспективи використання підземних вод водоносного горизонту тріщинуватої зони
кристалічних порід (Гідрогеологічна область Українського щита)111

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Dernov V., Udovychenko M.

- First record of the genus *Arcticocarcinus* Schweitzer et al., 2016 (Decapoda: Brachyura)
in the Danian of the Crimea (Ukraine) and its paleobiogeographic significance5

GEOFYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabatura O.

- Electric and elastic properties of consolidated terrigenous rocks of Cambrian period of the southern slope
of the Lviv palaeozoic trough15

Lubkov M.

- Modeling of landslide deformations under the action of gravity25

Iliencko V., Burakhovich T., Kushnir A.

- Interpretation of the 3D geoelectrical model of the intersection area
of the Zvizdal-Zaliska and Nemyrivsk fault zones31

Krasnikova O., Vyzhva S.

- Velocity model creation and theoretical basics of the methods of determining the hypocenter
of a microseismic event while performing hydraulic fracturing38

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Sattar-zadeh N., Imamverdiyev N.

- The peculiarities of the main ore-forming components distribution in the Filizchay field of the southern slope
of the Greater Caucasus43

MINERAL RESOURCES

Vyzhva S., Kurylo M., Payuk S., Tkachenko Y.

- Environmental and social risks in international and domestic systems of mineral resource assessment51

Bagriy I., Starodubets K., Malyshev O., Glon V.

- Hydrocarbon potential of the devonian sediments of Chernihivsko-Brahynskoho perspective district57

Buchynska I., Matrofaylo M., Poberezhskyy A.

- Comprehensive development of associated minerals and coal components of the Lyubelya deposit
of the Lviv-Volyn basin62

Komliev O.

- The zonality of ilmenite batteries within the boundaries of the Irshan battle field of the Ukrainian shield68

Bariatska N., Sergeieva S.

- Control samples using for quality assurance and control (QA/QC)75

Verkhovtsev V., Sushchuk K., Tyshchenko Yu., Meshcheriakov S., Koliabina I.

- Control of the environmental impact of uranium underground well mining
(on the example of Mykhailivka polygenic deposit of the Ukrainian shield)81

Mayboroda Ye., Kurylo M.

- Industrial types of carbonate raw material deposits and their cut off parameters for reserves estimation88

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Tyutyunnik Yu., Shabatura O., Blum O.

- Biogeochemical lichen-indication study of the state and dynamics of the atmospheric pollution of the arboretum
of the falz-fein biosphere reserve "Askania Nova"94

Romashchenko M., Bohaienko V., Sardak A., Nykytiuk O.

- Determination of the parameters of subsurface drip irrigation systems
on the base of moisture transport modeling103

Lyuta N.

- State and prospects of groundwater use in the aquifer of the fractured zone of crystalline rocks111

ПЕРША ЗНАХІДКА РОДУ

ARCTICOCARCINUS SHWEITZER ET AL., 2016 (DECAPODA, BRACHYURA) У ДАНСЬКОМУ ЯРУСІ КРИМУ (УКРАЇНА) ТА ЇЇ ПАЛЕОБІОГЕОГРАФІЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

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

Палеогенові десятиногі ракоподібні в Україні вивчені недостатньо. Дана група артропод не привертала значної уваги дослідників, незважаючи на те, що їхні рештки відомі в палеогені Придніпров'я, Донбасу, Криму та Карпат. У цій статті описується перша знахідка на території України декаподи роду *Arcticocarcinus* Schweitzer et al., 2016. Рештки походять з нижньої частини данського ярусу Передгірного Криму (розріз Ак-кая біля с. Біла Скеля Білогірського району). Фосилію знайдено *in situ* в нірці *Thalassinoides Ehrenberg, 1944*. Подібні знахідки дозволяють встановити які саме викопні декаподи створювали нірки *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* та *Spongiomorpha*. Відклади, в яких знайдено рештки крабу, є сильно біотурбованими. Зважаючи на присутність різноманітних іхнофосилій, можемо зробити припущення щодо накопичення цих відкладів в умовах скотітової іхнофації, що зазвичай поширена на морських субстратах, що постійно переміщуються хвилями. У данський вік на території сучасної Північної України розташовувався холодноводний басейн, який мав зв'язок із Західною Європою та Бореальним басейном. Значно теплішим був Південний басейн, який знаходився в Карпатах, Причорноморській западині, Криму та мав зв'язок із Середземноморським басейном. Представник роду *Arcticocarcinus* знайдений вперше за межами Швеції. Дуже малоймовірно, що представники роду *Arcticocarcinus* Schweitzer et al., 2016 проникли на територію сучасної Швеції з Криму чи навпаки через Польську протоку, оскільки цьому заважав Карпатський флішовий басейн, який, очевидно, був нездоланним бар'єром для розселення мілководної бентосної фауни. Судячи з усього, обмін фаунами відбувався через субширотні басейни – Дніпровсько-Донецьке море та Прип'ятську протоку. Вищезгадане море було частиною так званого моря Архангельського – великого субширотного палеобасейну, що простягався від відрогів Кавказу та Уралу до Західної Європи. Знахідка *Arcticocarcinus cf. insignis* Segerberg, 1900 розширює палеонтологічну характеристику відкладів данського ярусу Криму, а також свідчить про вільний обмін бентосними фаунами між Північною Європою та Кримом.

Ключові слова: десятиногі ракоподібні, палеоген, данський ярус, Крим, *Arcticocarcinus*.

Вступ. Рештки десятиногих ракоподібних (ряд Decapoda Latreille, 1802) не є рідкісними в палеогенових відкладах України. За результатами досліджень низки фахівців (Радкевич, 1900; Лихарев, 1917; Чернышев, 1949; Горбач, 1956; Грязнов, 1956; Селин, 1964; Бирштейн, 1960; Коробков, 1975; Ильин, 2005), вони відомі в канівському та київському регіоярусах Придніпров'я, київському регіоярусі Північного Донбасу, данському, танетському, іпрському, лютецькому та рюпельському ярусах Криму, олігоцені Карпат та Нікопольського басейну. Однак в останній час зазначена група тварин не привертає значної уваги вітчизняних палеонтологів, незважаючи на те, що її вивчення має велике палеогеографічне значення.

Під час досліджень палеогенових відкладів Передгірного Криму (розріз Ак-кая поблизу с. Біла Скеля Білогірського району – див. рис. 1) перший автор знайшов рештки панцира декаподи *Arcticocarcinus cf. insignis* (Segerberg, 1900). Зазначимо, що фосилія залягає *in situ* в нірці *Thalassinoides Ehrenberg, 1944*. Подібні знахідки, за даними І.В. Ільїна (Ільин, 2005), є дуже рідкісними, оскільки покриви переважної більшості ріючих декапод є досить м'якими і погано зберігаються у викопному стані. Однак лише подібні знахідки дозволяють встановити, які саме декаподи були продуцентами викопних нірок *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* та *Spongiomorpha*. Проте деякі краби, судячи з усього, можуть використовувати для існування також нірки, створені іншими організмами (Ільин, 2005), тож до інтерпретації інситуних фосилій ракоподібних у нірках формальної групи "SOT"

(*Spongiomorpha*, *Ophiomorpha* і *Thalassinoides* (Rindsberg, 2018)) слід ставитися вкрай обережно.

Метою цієї роботи є визначення палеобіогеографічного значення першої за межами Скандинавії знахідки крабів роду *Arcticocarcinus*.

Історія дослідження. Вивченню палеогенових десятиногих ракоподібних Криму присвячено роботи Е.І. Ейхвальда (Eichwald, 1865–1868), Д.Є. Макаренка (Макаренко, 1956), Є.С. Левицького (Левицкий, 1974) та І.В. Ільїна (Ільин, 2005).

Вперше викопну декаподу з палеогену Криму описав (проте не зобразив) Е.І. Ейхвальд (Eichwald, 1865–1868). Ним із палеогенових відкладів Бахчисараю під назвою *Podopilumnus aff. Fittoni* McCoy описано карапакс крабу, який згодом (Ільин, 2005) було віднесено до виду *Harpectocarcinus cf. lutugini* (Likharev, 1917).

У роботі Д.Є. Макаренка (1956) описано новий вид крабів – *Xanthopsis bodracus* Makarenko (= *Harpectocarcinus bodracus* (Makarenko)). Так званий крабовий горизонт з численними рештками *Harpectocarcinus lutugini* (Likharev) та *H. bodracus* (Makarenko) має ранньолутетський чи пізньоіпрський вік (Зернецький та ін., 2015).

Я.А. Бірштейн (Бирштейн, 1960) зобразив рештки крабу *Xanthopsis* sp. з еоцену м. Сімферополь. У статті Є.С. Левицького (Левицкий, 1974) з околиць м. Бахчисарай описано десятиногі раки *Protocallianassa* sp. (данський ярус) та *Xanthopsis lutugini* Likharev (= *Harpectocarcinus lutugini* (Likharev)) (нижній еоцен). У монографії І.В. Ільїна (Ільин, 2005) із палеогену Криму описано *Xanthopsis nodosa* McCoy, *Harpectocarcinus cf. lutugini* (Likharev)

та *Coeloma vigil* Milne-Edwards. У табл. 1 підсумовано всі дані щодо палеогенових декапод Криму.

Б.Т. Янін (Янін, 1978) описав значну кількість нірок десятиногих ракоподібних *Thalassinoides* із тонкозернистих пісковиків верхнього маастрихту на просторі від р. Бельбек до вододілу річок Бодрак та Альма. Менш численні нірки присутні в данських пісковиках та вапняках розрізів на річках Бодрак та Бельбек. Автор цитованої роботи робить припущення, що нірки належать декаподам *Protocalliannassa*, рештки яких трапляються в зазначених породах.

В іншій роботі (Янін і Барабошкин, 2013) описано нірки *Thalassinoides* із нижньої крейди Кримського півострова. Тут же зроблено короткий огляд знахідок інситних решток десятиногих ракоподібних у нірках *Thalassinoides*. Наприклад, зазначається, що в них знайдено рештки декапод різної систематичної належності, а саме: *Mecochirus rapax* (Harbort) у нижньому баремі Португалії, *Antarctidromia inflata* Förster у міоцені Антарктиди, *Hoploparia longimana* (Sowerby) в готериві Криму тощо. Численні нірки *Thalassinoides* на поверхнях "твердого дна" присутні також у данських відкладах гори Бешкош (АР Крим, західніше від м. Бахчисарай) (Барабошкин і др., 2020).

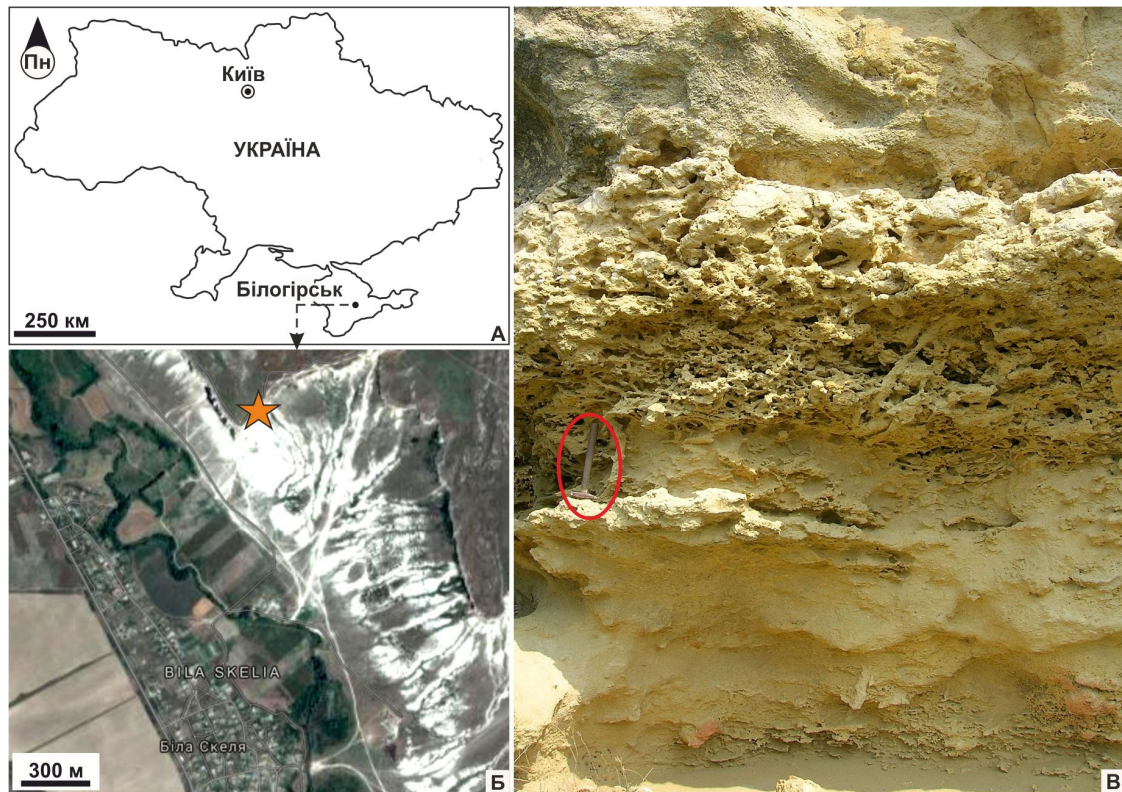


Рис. 1. Географічне положення місцезнаходження (позначене зірочкою) решток десятиножного рака *Arcticocarcinus* cf. *insignis* (Segeber, 1900) (фіг. А, Б) та відслонення суттєво біотурбованих відкладів данського та лютецького ярусів поблизу с. Біла Скеля Білогірського району АР Крим (фіг. В)

Таблиця 1

Палеогенові декаподи Криму (Україна)

Таксон	Вік	Автор
<i>Coeloma vigil</i> Milne-Edwards, 1865	Рюпель	Ильин, 2005
<i>Xanthopsis</i> sp.	Еоцен	Бириштейн, 1960
<i>Harpacticarcinus bodracus</i> (Makarenko, 1956)	П. лютет	Макаренко, 1956
<i>Harpacticarcinus</i> cf. <i>lutugini</i> (Likharev, 1917)	П. лютет	Ильин, 2005
<i>Harpacticarcinus</i> cf. <i>lutugini</i> (Likharev, 1917)	Р. еоцен	Eichwald, 1865–1868 (цит. за роботою І.В. Ільїна (Ильин, 2005))
<i>Harpacticarcinus lutugini</i> (Likharev, 1917)	Р. лютет чи п. іпр	Левицкий, 1974
<i>Xanthopsis nodosa</i> McCoy, 1849	Р. іпр	Ильин, 2005
<i>Protocalliannassa</i> sp.	Даній	Левицкий, 1974
<i>Arcticocarcinus</i> cf. <i>insignis</i> (Segeber, 1900)	Р. даній	Ця стаття

На території Європи палеоценові декаподи відомі у Швеції (Segeber, 1900; Jagt et al., 1993; Collins and Jakobsen, 1994), Данії (Nielsen, 1917; Jagt et al., 1993; Collins and Jakobsen, 1994; Jakobsen and Collins, 1997; Jakobsen and Feldmann, 2004; Collins, 2010; Jakobsen et al., 2020), Нідерландах (Jagt et al., 1993), Франції (Robin et al., 2017), Польщі (Fraaye, 1994; Fraaije et al., 2018), Австрії (Förster, 1970; Verhoff et al., 2009) та Італії (Dieni, 2010).

Фауну декапод данського ярусу вивчено нерівномірно, хоча її дослідження має велике значення для виявлення тенденцій розвитку морської бентосної фауни поблизу мезозойсько-кайнозойського рубежу. Слід зауважити, що порівняно з іншими групами фауни таксономічне різноманіття декапод несуттєво скоротилося внаслідок глобального вимирання на межі крейди та палеогену. Наприклад, за даними Карен Швайцер та Родні

Фельдмана (*Schweitzer and Feldmann, 2005*), з маастрихту відомо щонайменше 42 роди крабів, з яких у даній переходять не менш як 12 (28,6 %).

Стратиграфія. Данію та нижній частині зеландію в Криму відповідає білокам'янський регіоарус в обсязі нанопланктонних зон NP1–NP5. Найнижча частина білокам'янського регіоарусу виділяється в білокам'янську світу, яка складається з двох підсвіт: нижньої та верхньої. Нижня підсвіта представлена кварц-глауконітовими зеленувато-сірими алевролітами та пісковиками із фосфоритами (1,5–2 м) та детритово-моховатковими, кріноїдно-моховатковими та серпуловими вапняками (40–60 м). Верхня підсвіта складена світлими органогенно-уламковими та форамініферово-кріноїдними вапняками (45 м) (*Зосимович та ін., 2005; Зернецький та ін., 2014*).

Глауконітові алевроліти та тонкозернисті пісковики базального шару данію (=нижня підсвіта білокам'янської світи) Г.Ф. Вебер (*Маслакова и Волошина, 1969*) віднесла до зони *Protobrissus akkajensis* (=Pseudogibbaster akkajensis за даними (*Найдин и Беньямовский, 2000*)). У відкладах цієї зони поширені рештки бівальвів *Pycnodonte beshkoshensis* (Weber), *P. simile* (Pusch), *P. vesicularis* (Lamarck) та наутилід *Pseudocenceras warsanofievie* Shimansky і *Teichertia similis* Shimansky (*Москвин и Найдин, 1960; Шуманский, 1975*). Цю ж частину розрізу данського ярусу О.С. Вялов та Л.П. Горбач (1982) виділили як зони *Pycnodonte beshkoshensis*.

У Білогірському районі АР Крим данські відклади представлені лише нижньою пачкою піскуватих мергелів чи пісковиків завтовшки 5–6 м, що містять рештки наутилід *Hercoglossa danica* (Schlotheim) та морських їжаків *Hemaster inkermanensis* Lorient, *Echinocorys sulcatus* Goldfuss і *Protobrissus canaliculatus* (Cotteau) (*Маслакова и Волошина, 1969; Муліка, 1971*). Верхня частина данських відкладів тут розмита еоценовою трансгресією (*Муліка, 1971*). Найнижча частина детритових вапняків присутня в деяких секторах розрізу Ак-кая. Розріз палеогену на схилах г. Ак-кая детально описано в роботі (*Дубкова и др., 2019*), тому за детальнішою інформацією щодо його будови відсилаємо читача до вказаної статті.

У 2011 р. на південно-східному схилі г. Ак-кая, приблизно в 0,6 км східніше від лощини, якою проходить путівець від с. Біла Скеля до вершини даної гори та в 0,9 км східніше від місця знахідки решток крабу (координати: 45°06'20.0"N 34°37'29.3"E), перший автор (*В.Д.*) описав такий розріз найвищої частини верхньокрейдових та палеогенових відкладів (знизу догори):

Верхній маастрихт: верхня частина старосільської світи

1. Мергелі піщаністі та алевритисті, сірі та жовтуватобілі, шаруваті; трапляються часті скупчення черепашок пектенід та устриць, уламки роствів белемноїдей, ядра черепашок наутилід та амонітів, а також нірки десятиногих раків. Контакт із шаром № 2 різкий, зі слідами підводного розмиву; він несе численні нірки *Thalassinoides*, що заповнені пісковиком шару № 2 (верхня поверхня товщі – фірм- чи хардграунд, на якому набула розвитку глоссіфунгітова іхнофація). Товщина видима – 10 м.

Покрівлю маастрихту на Ак-каї також пронизують широкі вертикальні тріщини, заповнені уламками нумулітових вапняків, які інтерпретуються як нептунічні дайки (*Горбач и Добровольская, 1964; Лыгина и др., 2019а*) або як сліди палеокарсту (*Шишлоєв и др., 2020*).

Данський ярус, білокам'янський регіоарус: білокам'янська світа, нижня підсвіта

2. Пісковик мергелистий, дрібно- і тонкозернистий, щільний, інколи слабо зцементований, глауконітовий,

сіривато-зелений з плямами гідроксидів заліза. Трапляються рештки серпулід, устриць, наутилід *Pseudocenceras warsanofievie* Shimansky (*Дернов та Удовиченко, 2016*), морських їжаків *Protobrissus canaliculatus* (Cotteau), а також нірки *Thalassinoides*. У цьому шарі знайдено рештки короткохвостого рака *Arcticocarcinus cf. insignis* (Segerberg, 1900), що описуються нижче. Товщина – 3,5 м.

3. Вапняки детритово-моховаткові та серпулові, жовтуватокремовеого кольору. Нижній контакт нерівний, зі слідами розмиву. У 60 м західніше від точки спостереження цей шар виклинюється. У нижній його частині спостерігається прошарок (0,4 м) кріноїдних вапняків жовтуватокремовеого кольору з рідкісною галькою та гравієм. Товщина – 2 м.

4. Нумулітові вапняки світло-сірого та білого кольору, міцні, товстоплитчасті. В основі залягає прошарок із фосфоритовою та кременевою галькою, а також перевідкладеними рештками молюсків. Товщина видима – 12 м.

Рештки крабу, як вже зазначалося вище, знайдено в пісковиках шару № 2 (шар № 1 за роботою (*Дубкова и др., 2019*)). Пісковики цього шару відповідають пачці I опорного розрізу палеогену біля м. Бахчисарай (*Воронина, 1989*). Недалеко від місця знахідки решток крабу, з осипів, що складаються з уламків данських пісковиків та вапняків, ми зібрали таку фауну: поліхети *Rotularia (R.) akkaiensis* (Makarenko) Pasternak comb. nov. (див. нижче), *Glomerula gordialis* (Schlotheim), *Protula* sp., брахіоподи *Danocrania polonica* Rosenkrantz, бівальві *Pycnodonte simile* (Pusch), *P. bechkoehensis* (Weber), cf. *Ostrea praemontensis* Gorbach, голки невизначених морських їжаків та панцир *Phymosoma* sp., членики стебел кріноїдів *Nielsenicrinus* sp. та фрагмент коронки зуба еласмобранхії.

Матеріал та методика. Єдиний вивчений екземпляр (IGSU-8/1) представлений внутрішнім ядром панцира з невеликими фрагментами вцілілої кутикули. У цій статті використовується систематика десятиногих ракоподібних, що представлена в роботі (*Schweitzer et al., 2018*). Морфологічну термінологію взято з роботи (*Ильин, 2005*).

Вивчений екземпляр (IGSU-8/1) зберігається у відділі стратиграфії та палеонтології палеозойських відкладів Інституту геологічних наук НАН України (Київ). Перед фотографуванням фосилія була вкрита шаром хлориду амонію. Скорочення, що використовуються при описі морфології крабу: Д – довжина карапакса, Ш – ширина карапакса.

Систематичний опис

Ряд Decapoda Latreille, 1802
Інфраряд Brachyura Latreille, 1802
Секція Raninoidea Ahyong, Lai, Sharkey, Colgan et Ng, 2007
Надродина Necrocarcinoidea Förster, 1968
Родина Necrocarcinidae Förster, 1968
Під *Arcticocarcinus* Schweitzer, Karasawa, Luque et Feldmann, 2016

Типовий вид: *Necrocarcinus insignis* Segerberg, 1900; оригінальне визначення за монотипією.

Інші види. На сьогодні відомий тільки типовий вид.

Діагноз. Див. (*Schweitzer et al., 2016: p. 352; Schweitzer et al., 2018: p. 7*). Деякі характерні риси морфології роду перелічено нижче (рубрика "Зауваження" в тексті монографічного опису виду).

Поширення. Данський ярус (палеоцен) Швеції та України (Крим).

Arcticocarcinus cf. insignis (Segerberg, 1900)

Рис. 2

Матеріал. Єдиний екземпляр карапаксу поганої збереженості (IGSU-8/1).

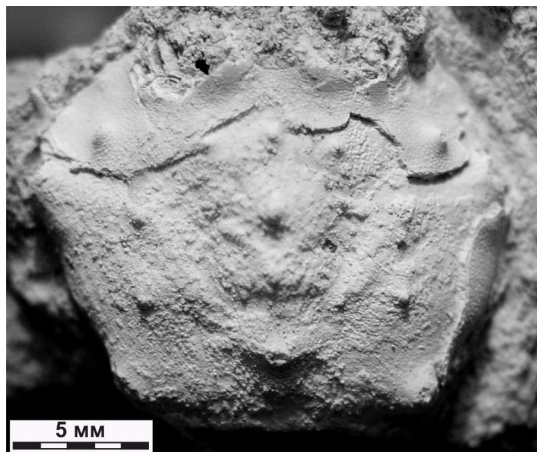


Рис. 2. Рештки карапаксу крабу *Arcticocarcinus cf. insignis* (Segerberg, 1900): данський ярус, с. Біла Скеля (Білогірський район, АР Крим; екз. IGSU-8/1)

Опис. Карапакс невеликий (Д – 17 мм, Ш_{макс} – 18 мм), майже шестикутної форми. Довжина карапаксу трохи менша за його максимальну ширину (Д/Ш = 0,94), лінія якої знаходиться приблизно на 1/3 відстані від заднього до переднього краю карапаксу. Ширина лобного краю становить приблизно 56 % максимальної ширини карапаксу. Карапакс слабо випуклий у повздовжньому та поперечному напрямках. Ростр не зберігся. Орбіти досить великі, з обох боків обмежені гострими виступами. Бокові краї карапаксу плоскі, задній – трохи увігнутий. Уздовж заднього краю проходить крайова кайма. На передньо-латеральному краю розміщені основи обламаних великих шипів. На наявному матеріалі, який представлено ядром карапаксу із частково збереженою кутикулою, спостерігаються лише по парі глибоких цервікальних та бронхіокардіальні борозни. Гастральна та кардіальна області злегка підвищені над поверхнею карапаксу, яка вкрита округлими гострими туберкулами, що сконцентровані в три повздовжні ряди: один гастральний і два бронхіальні. Гастральний ряд утворюють більші за розміром туберкули. Поблизу заднього краю по обидва боки карапаксу розташовані горбки-виступи. На фрагменті поверхні карапаксу, що зберігся на ядрі, спостерігаються дрібні гранули. Прейоподи та клешні не збереглися.

Зауваження. Описану вище декаподу віднесено до роду *Arcticocarcinus* Schweitzer et al., 2016 на підставі наступних морфологічних ознак: ширина карапаксу трохи більша за його довжину, суборбітальна область з шипами, передньо-латеральний край із великим шипом із кожного боку панцира, є один гастральний та два бронхіальні ряди гострих туберкул.

Порівняння. Описана форма морфологічно дуже близька до голотипу *Arcticocarcinus insignis* (Segerberg, 1900) (екз. LO1551t у відділі геології Лундського університету, Лунд, Швеція) із данського ярусу Швеції (див., наприклад, Fig. 6A в роботі (Schweitzer et al., 2016)). Слід зауважити, що в описаній вище формі гастральна та кардіальна області виражені більш рельєфно, ніж у голотипу *Arcticocarcinus insignis*. Можливо, ця особливість спричинена специфікою збереження матеріалу (вивчений екземпляр представлений ядром, у той час як голотип – повністю збереженим панцирем). Відношення Д/Ш у голотипу має дещо менше значення, ніж у кримського екземпляра (0,89 проти 0,94 відповідно). Розміри голотипу та описаного вище екземпляра майже ідентичні, однак недостатня збереженість наявного матеріалу не

дозволяє впевнено віднести кримську декаподу до виду *Arcticocarcinus insignis* (Segerberg, 1900).

Місцезнаходження. Україна, АР Крим, Білогірський район, схил гори Ак-кая біля с. Біла Скеля; палеоцен, данський ярус, нижня підсвіта білокам'янської світи. Збори В.С. Дернова, 2011 р.

Поширення. Данський ярус Криму та Швеції (Segerberg, 1900; Schweitzer et al., 2016).

Палеогеографія. Данський басейн Криму входив до складу Північного Перитетису (Копаєвич у др., 2010; Лыгина у др., 2019б). Глибина ранньоданського басейну коливалась від декількох десятків до декількох сотень метрів (Копаєвич у др., 2010; Лыгина у др., 2019б). У данському віці на території сучасного Криму формувалась карбонатна платформа; у Центральному Криму (у районі досліджень) був розташований її схил (Копаєвич у др., 2010; Лыгина у др., 2019б). З півдня данський басейн був обмежений низьким, сильно розчленованим суходолом, що був головним джерелом уламкового матеріалу південної частини палеобасейну (Воронина, 1989).

Часті ірки десятиногих ракоподібних присутні в покривлі маастрихту розрізу Ак-кая. Вік утворення цих пірок данський (наші дані) та еоценовий (Лыгина у др., 2019б) у випадку, коли детритові вапняки данію відсутні і маастрихт перекривається нумулітовими вапняками еоцену. Зважаючи на присутність численних іхнофосилій *Thalassinoides* та літологічні особливості відкладів, можемо зробити припущення щодо накопичення пісковиків шару № 2 в умовах сколітової іхнофації, що зазвичай розвивається за помірної та високої енергії водного стовпа, постійного переміщення субстратів, епізодичної ерозії та мілководно-морськими та приливо-відливними умовами (Seilacher, 1967; Droser, 1991). Базальні пісковики данію сформувалися недалеко від берега на глибинах до 50 м в умовах гумідного клімату (Воронина, 1989).

Поверхня контакту верхньокрейдових мергелів та пісковиків данського ярусу є хардграундом з розвинутим на ньому та нижче нього глоссіфунгітовою іхнофацією, яка функціонувала вже в данський час. Для цієї іхнофації були характерними висока енергія водного стовпа та присутність організмів, які здатні біотурбувати порівняно щільні субстрати (Микулаш у Дронов, 2006).

Представник описаного вище роду короткохвостих раків уперше знайдено за межами Швеції. Саме тому простежити шляхи обміну палеоценівими фаунами між Кримом і Скандинавією, а також іншими регіонами, опираючись на власний та опублікований матеріал, було б доречним.

За даними робіт Н.І. Маслакової та М.В. Ярцевої (Ярцева, 1973; Маслакова у Науен ван Нюок, 1975), комплекси бентосних форамініфер данського ярусу Криму та Західної Європи є досить близькими. Рештки коралів дуже рідко трапляються в данських відкладах Криму, однак тут присутні спільні види з одновіковими відкладами Польщі, Нідерландів, Бельгії, Північного Кавказу, Копетдагу (Туркменістан та Іран), Мангшлаку та Урало-Ембінської області (Казахстан) (Кузьмичева, 1987).

Користуючись нагодою, зазначимо, що описаний Д.Є. Макаренком (Макаренко, 1963) із глауконітових піщаних вапняків "нижнього еоцену" гори Ак-кая новий вид гастропод *Vermetus akkaiensis* Makarenko насправді є представником поліхет. Він морфологічно ідентичний до описаного С.І. Пастернаком (1973) виду поліхет *Rotularia (R.) inflata* Pasternak (данський чи верхи маастрихтського ярусу р. Бельбек, Крим). Наразі ці поліхети віднесено до іншого підроду – *Praerotularia* Lommerzhheim, 1979

(Jäger, 1993). Отже, нова назва виду, згідно з правилом пріоритету, має мати такий вигляд: *Rotularia (Praerotularia) akkaiensis* (Makarenko) Pasternak comb. nov. Голотип цього виду Д.Є. Макаренком не вказаний, тому як лектотип рекомендуємо екземпляр № 28956 (колекція С.І. Пастернака), що зберігається в Державному природознавчому музеї у Львові. За нашими спостереженнями, вид *Rotularia (Praerotularia) akkaiensis* поширений у глауконітових пісковицях та детритових серпулово-моховаткових вапняках данського ярусу розрізу Ак-кая.

Як зазначається в багатьох роботах (Найдин, 1960; Горбач, 1972; 1975; Вялов і Горбач, 1982), систематичний склад малакофауни та брахіопод данського ярусу Криму, Данії та Бельгії досить близький. На основі цього Л.П. Горбач (1972; 1975) зробила припущення про вільний зв'язок данських акваторій Криму та Західної Європи. Наявність ендеміків серед гастропод та пелеципод вона пояснює не специфічними фізико-географічними умовами палеоакваторії чи її ізоляваністю, а низьким рівнем вивченості молюскової та брахіоподової фауни цього віку.

Серед морських їжаків роду *Echinocorys* із данського ярусу Криму є спільні види з одношкірними відкладами Мангшлаку, Кавказу, Польщі, Данії та Швеції. У той же час види, які були значно поширені на Кавказі та Копетдазі, майже повністю відсутні в Криму, Мангшлаку та Прикаспійській западині (Москвин і Шиманская, 1993). Систематичний склад морських їжаків ряду *Spatangoida* з данського ярусу Кримського півострова близький до комплексів з одношкірних відкладів Данії, Бельгії, Франції, Болгарії, Устюрту, Мангшлаку та Кавказу (Пославская і Москвин, 1960).

Комплекс наутілід данського ярусу Криму (Шиманский, 1975; Дернов та Удовиченко, 2016; Дернов, 2019) ближчий до асоціації, відомих з данію Кавказу та Мангшлаку, ніж Західної Європи: з дев'яти форм наутілід, відомих із відкладів данського ярусу Криму, лише три присутні в Західній Європі. Із цих трьох форм вік однієї точно не встановлено (маастрихт або даній).

У нижній частині данських відкладів розрізу Мічурине, що знаходиться приблизно в 10 км східніше від розрізу Ак-кая, встановлено комплекс еласмобранхій, близький до асоціації Західної Європи, Північної Африки, Поволжя та Мангшлаку (Удовиченко, 2013). Данський комплекс еласмобранхій Криму має 59 % спільних родів з одношкірними асоціаціями Данії, такий же відсоток подібності підраховано для данію Поволжя та трохи більший (70 %) – для Марокко (Триколиди і Голубев, 2017).

У межах Українського щита данський вік мають вкрай мілководні відклади лузанівських верств (Шевченко, 2016) або макартитської світи лузанівської серії (Маслун та Іванік, 2009). Данські відклади встановлено також у межах Дніпровсько-Донецької западини. Тут дансько-ранньозеландський вік має так званий псьольський регіоарус (Зосимович та Шевченко, 2015, 2016). В Українських Карпатах (Вежанський покрив) данський вік має нижня частина метовської світи, яка складена турбідами (Андрєєва-Григорович та ін., 2012).

За даними Д.Є. Макаренка (1973) та деяких інших дослідників (Маслун та Іванік, 2009), морські відклади данського віку присутні в межах Конксько-Ялинської западини. Тут вони представлені пісками з рештками форамініфер, молюсків та коралів. Систематичний перелік форамініфер, за даними М.В. Ярцевої (Макаренко, 1973), близький до данських асоціацій Західної Європи та Північної Америки; комплекс малакофауни схожий на асоціації лузанівських верств сумської світи Українського щита. Д.Є. Макаренко (1973) робить висновок про вільний зв'язок данських акваторій Дніпровсько-

Донецької западини, Українського щита та Причорноморської западини. Сполучення Північно- та Південно-українських палеоценових басейнів відбувалося системою грабенів, розташованих між сучасними містами Дніпро та Кропивницький та через Конксько-Ялинську западину. Через Молочанський грабен відбувався зв'язок з палеоакваторією Західного Приазов'я.

При розгляді питання зв'язків данських фаун Європи значний інтерес становлять роботи В.Н. Беньямовського (Беньямовский, 2003, 2009, 2013; Akhmet'ev and Beniamovski, 2006). На рис. 1 у статті (Беньямовский, 2003) та на рис. 8.6 у роботі (Беньямовский, 2013) представлено палеогеографічні схеми широтних і довготних проток Північно-Західної Європи у палеогені. Відповідно до цієї схеми данські акваторії сучасного Криму мали безпосередній зв'язок із басейнами Північної та Західної Європи через Польську та Прип'ятську субширотні протоки (рис. 3).

У статтях В.Н. Беньямовського (2009, 2013) підкреслюється особливе значення Дніпровсько-Донецького палеобасейну для розселення форамініфер у палеогені. Тут же акцентується увага на близькості комплексів форамініфер Південної Швеції та Дніпровсько-Донецької западини. Крім того, палеоценові асоціації Дніпровсько-Донецької западини містять види, що відомі у східніших районах Євразії – аж до Західного Сибіру, проте не відомі у Західній та Північній Європі. У цій статті робиться висновок, що в палеогені через Дніпровсько-Донецький басейн та Польську протоку відбувалося розселення близьких у систематичному плані асоціацій форамініфер у Крим та Північну і Західну Європу. Раніше до схожих висновків, проте за даними вивчення гастропод, дійшов О.В. Амітров (Амитров, 1987).

У данський вік на території сучасної Північної України розташовувався холодноводний басейн, який мав зв'язок із Західною Європою та Бореальним басейном. Значно теплішим був Південний басейн, який розташовувався в Карпатах, Причорноморській западині, Криму та був тісно пов'язаний із Середземноморським басейном (Зернецький, 2017).

На нашу думку, дуже мало ймовірно, що представники роду *Arcticocarcinus* Schweitzer et al., 2016 проникли на територію Скандинавії з Криму чи навпаки через Польську протоку, оскільки цьому заважав Карпатський флішовий басейн (так званий Русичанський палеобасейн (Андрєєва-Григорович та ін., 2017; Супрун, 2021)), який, очевидно, унеможливив розселення мілководної бентосної фауни. За даними вивчення нанопланктону (Супрун, 2021) седиментація в цьому палеобасейні відбувалась у батіальних умовах. Однак слід зазначити, що в нижній частині ямнської світи (зеландій-танет) відомий так званий яремчанський строкатоколірний "горизонт", представлений перешаровуванням зелених аргілітів та алевролітів і червоних пісковиків (Генералова та Костюк, 2012), в якому знайдено мілководно-морську біоту, у тому числі губки, корали, устриці, моховатки, беззамкові брахіоподи та вусоні раки (Вялов і др., 1960). Седиментаційний аналіз цих строкатоколірних верств свідчить на користь досить спокійних глибоководних умов їх накопичення за помірної участі турбідитних потоків та контурних течій (Генералова та Костюк, 2012). Отже, рештки мілководно-морської фауни є, ймовірно, алохтонними, тобто принесеними суспензійними потоками з більш мілководних частин акваторії. Зазначимо, що поняття "горизонт" у стратиграфії не є терміном вільного користування, тому, на нашу думку, доцільнішим було б говорити про "яремчанські строкатоколірні верстви" або просто "яремчанські верстви". Ця вимога чітко прописана у "Стратиграфічному кодексі України" (Стратиграфічний..., 2012).



Рис. 3. Палеогеографія Західної Євразії в данський вік. Помаранчеві зірочки – місця знахідок крабів *Arcticocarcinus*. Складено з використанням даних В.Н. Беньямовського (Беньямовский, 2003, 2009, 2013).

Палеогеографічну основу взято з інтернет-ресурсу (<https://deeptimemaps.com/global-paleogeography-and-tectonics-in-deep-time/>)

З території Польщі відомі данські декаподи *Titanocarcinus polonicus* Fraaye, *Necrocarcinus senonensis* Schlüter in von der Marck et Schlüter (Fraaye, 1994), а також *Hoploparia nasilowensis* Fraaije et al., 2018 (Fraaije et al., 2018). Як бачимо, жодного спільного роду з даним Криму тут немає, хоча присутній близький до *Arcticocarcinus* рід *Necrocarcinus*. У деяких роботах, наприклад у (Collins and Jakobsen, 1994), *Arcticocarcinus insignis* помилково синонімізувався з видом *Necrocarcinus senonensis*, тому є ймовірність, що представники роду *Necrocarcinus* з данського ярусу Польщі насправді належать до роду *Arcticocarcinus*.

Отже, судячи з усього, обмін данськими бентосними фаунами відбувався через субширотний басейн – Дніпровсько-Донецьке море та Прип'ятську протоку. Вищезгадане море було частиною так званого моря Архангельського – великого субширотного басейну, що простягався від відрогів Кавказу та Уралу до Західної Європи (Беньямовский, 2009; Маслун та Іванік, 2009).

Висновки. Із данського ярусу Криму описано короткохвостого рака *Arcticocarcinus* cf. *insignis* (Segerberg, 1900). Представник роду *Arcticocarcinus* вперше знайдений за межами Швеції. Фосилія залягає *in situ* в нірці, що належить до їхнороду *Thalassinoides* Ehrenberg, 1944. Подібні знахідки є дуже рідкісними, проте лише вони дозволяють встановити, які саме викопні декаподи створювали нірки *Ophiomorpha*, *Thalassinoides* та *Spongiomorpha*. Ця знахідка розширює палеонтологічну характеристику данського ярусу Криму та свідчить про вільний зв'язок данських акваторій півдня України та Північної і Західної Європи. Результати досліджень демонструють значні перспективи вивчення решток ракоподібних із палеогенових відкладів України.

Список використаних джерел

Амитров, О.В. (1987). Палеогеновые моря Украины как связующее звено между морями Северо-Западной Европы и Юга СССР (на

материале брюхоногих моллюсков). В Биостратиграфия, палеонтология осадочного чехла Украины. Киев, 148–152.

Андреева-Григоревич, А.С., Гнилко, О.М., Гнилко, С.Р. (2012). Межа крейди-палеогену у відкладах Вежанського покриву (зона Мармароських скель) Внутрішніх Українських Карпат. Палеонтологічні дослідження в удосконаленні стратиграфічних схем фанерозойських відкладів: Матеріали XXXIV сесії Палеонтологічного товариства НАН України, Київ, 66–67.

Андреева-Григоревич, А.С., Маслун, Н.В., Іванік, М.М. та ін. (2017). Кайнозойська історія палеобасейнів Українських Карпат. 40 років Палеонтологічного товариства України: Матеріали XXXVIII сесії Палеонтологічного товариства НАН України, Київ, 103–105.

Барабошкин, Е.Ю., Гужинов, А.Ю., Александрова, Г.Н. и др. (2020). Новые седиментологические, магнитостратиграфические и биостратиграфические данные по разрезу кампана-маастрихта горы Бешкош, юго-западный Крым. Стратиграфия. Геологическая корреляция, 28 (6), 125–170. <https://doi.org/10.31857/S0869592X20060046>

Беньямовский, В.Н. (2003). Пролиты, водные массы, течения и палеобиогеографическое районирование морских бассейнов палеоцена Северо-Западной Евразии по фораминиферам. Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический, 78 (4), 56–77.

Беньямовский, В.Н. (2009). Днепровско-Донецкий бассейн как связующее звено между морями Северо-Западной Евразии (по материалам палеоценовых бентосных фораминифер). Сборник научных работ Института геологических наук НАН Украины, 207–211.

Беньямовский, В.Н. (2013). Палеобиогеография бентосных фораминифер в палеоценовых акваториях средних и высоких широт Северной Евразии. В Стратиграфия в начале XXI века – тенденции и новые идеи. Москва: Геокарт-ГЕОС, 145–167.

Бирштейн, Я.А. (1960). Отряд Decapoda. Основы палеонтологии. Т. 8. Членистоногие, трилобитообразные и ракообразные. Москва: Государственное научно-техническое издательство литературы по геологии и охране недр, 439–456.

Воронина, А.А. (1989). Палеогеновая система. В Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма. Москва, 4–35.

Вялов, О.С., Горбач, Л.П. (1982). Значение позднемиловых и палеогеновых устриц для стратиграфии и межрегиональной корреляции (на примере Крыма). Современное значение палеонтологии для стратиграфии: Труды XXIV сессии Всесоюзного палеонтологического общества. Ленинград: Наука, 98–103.

Вялов, О.С., Дабаган, Н.В., Кульчицкий, Я.О. (1960). О границе между мелом и палеогеном в Восточных Карпатах. В Граница меловых и третичных отложений. Москва: Издательство АН СССР, 105–122.

Генералова, Л.В., Костюк, О.В. (2012). Седиментологічні риси крейдово-еоценових строкатоколірних горизонтів Скибкої структурно-фаціальної зони Українських Карпат. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України, 5, 89–94. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2012.147544>

- Горбач, Л.П. (1956). О находках крабов в менилитовых сланцах Восточных Карпат. *Геологический сборник Львовского геологического общества*, 2/3, 30–42.
- Горбач, Л.П. (1972). Стратиграфия и фауна моллюсков раннего палеоцена Крыма. Москва: Недра.
- Горбач, Л.П. (1975). Палеоцен по данным изучения моллюсков из крымских разрезов. *Палеонтологический сборник*, 12, 106–111.
- Горбач, Л.П., Добровольская, Т.И. (1964). О нижнемеловых палеосейсмических явлениях в Крыму. *Доклады Академии наук СССР*, 154 (3), 500–502.
- Грязнов В.И. (1956). О приуроченности находок краба *Coeloma vigil* М.-Edw. к олигоценным марганцевородным фациям. *Доклады АН СССР*, 106 (4), 717–719.
- Дернов, В.С. (2019). Нові дані щодо систематичного складу пізньокрейдових і палеогенових наутилід Донбасу та Криму. *Проблеми геології фанерозою України: Матеріали X Всеукраїнської наукової конференції, 9–11 жовтня 2019 р., Львів*, 33–35.
- Дернов, В., Удовиченко, М. (2016). Деякі палеогенові наутилоїдеї Донбасу та Криму. *Палеонтологічний збірник*, 48, 19–27.
- Дубкова, К.А., Шишлов, С.Б., Черепашина, А.Б. (2019). Разрез палеоцена-эоцена в районе горы Ак-кая (Центральный Крым) и его геосторическая интерпретация. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (1), 4–23. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.101>
- Зернецкий, Б.Ф. (2017). Палеоценові нумулітиди України. *40 років Палеонтологічному товариству України: Матеріали XXXVIII сесії Палеонтологічного товариства НАН України, Київ*, 111–112.
- Зернецкий, Б.Ф., Рябоконь, Т.С., Люльева, С.А. (2014). Питання вивчення осадового комплексу палеоцену Кримського і Керченського півостровів. *Збірник наукових робіт Інституту геологічних наук НАН України*, 7, 101–125. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2014.146861>
- Зернецкий, Б.Ф., Рябоконь, Т.С., Люльева, С.А. (2015). Питання вивчення осадового комплексу еоцену Кримського і Керченського півостровів. *Збірник наукових робіт Інституту геологічних наук НАН України*, 8, 32–62. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2014.146861>
- Зосимович, В.Ю., Зернецкий, Б.Ф., Андреева-Григоревич, А.С. та ін. (2005). Регіонарські палеогену платформної України. У *Біостратиграфічній критерії розчленування та кореляції відкладів фанерозою України*. Київ, 118–132.
- Зосимович, В.Ю., Шевченко, Т.В. (2015). Палеогенові відклади Північноукраїнської палеоседиментаційної провінції. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, 8, 68–121. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146712>
- Зосимович, В.Ю., Шевченко, Т.В. (2016). Про зміни до регіонарської шкали палеогену Північної України. *Матеріали XXXVII сесії Палеонтологічного товариства НАН України*. Київ, 71–73.
- Ильин, И.В. (2005). Меловые и палеогеновые десятиногие ракообразные (Crustaceomorpha, Decapoda) западной части Северной Евразии. Москва: Издательство Московского государственного университета.
- Копаявич, Л.Ф., Лыгина, Е.А., Яковичина, Е.В. и др. (2010). Датские отложения Крымского полуострова: фациальные особенности и условия накопления. *Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология*, 5, 12–20.
- Коробков, И.А. (1975). Десятиногие ракообразные. В *Стратиграфия СССР. Палеогеновая система*. Москва: Недра, 433–435.
- Кузмичева, Е.И. (1987). Меловые и палеогеновые кораллы Украины. В *Біостратиграфія, палеонтологія осадового чехла України*. Киев: Наукова думка, 143–147.
- Левицкий, Е.С. (1974). Ископаемые десятиногие ракообразные окрестностей Бахчисарая. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*, XLIX (6), 101–119.
- Лыгина, Е.А., Никишин, А.М., Тверитинова, Т.Ю. и др. (2019а). Эоценовые палеосейсмодислокации горы Ак-кая (Белогорский район, Крым). *Вестник Московского государственного университета. Сер. 4. Геология*, 1, 46–56. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-1-46-56>
- Лыгина, Е.А., Устинова, М.А., Габдуллин, Р.Р. и др. (2019б). Пограничные маастрихт-датские отложения Центрального Крыма: новые данные о известковом наннопланктоне. *Вестник Московского государственного университета. Сер. 4. Геология*, 1, 68–79.
- Макаренко, Д.С. (1956). Рештки крабів із палеогенових відкладів Криму. *Геологічний журнал*, XVI (3), 74–76.
- Макаренко, Д.С. (1963). Деякі нові та маловідомі види моллюсків із палеогенових відкладів УРСР. *Геологічний журнал*, XXIII (4), 90–99.
- Макаренко, Д.С. (1973). Морські відклади палеоцену Конксько-Ялинської западини. *Тектоніка і стратиграфія*, 6, 45–49.
- Маслакова, Н.И., Волошина, А.М. (1969). Меловая система. Верхний отдел. В *Геология СССР. Т. VIII. Крым. Часть 1. Геологическое описание*. Москва: Недра, 114–155.
- Маслакова, Н.И., Нгуен ван Нгок (1975). Распространение бентосных фораминифер в пограничных отложениях мела и палеогена Юго-Западного Крыма. В *Развитие и смена органического мира на рубеже мезозоя и кайнозоя. Новое о фауне*. Москва: Наука, 7–14.
- Маслун, Н.В., Іванік, М.М. (2009). Палеоценові відклади Українського щита та особливості седиментогенезу палеоценового моря Арахангельського. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*, К., 199–206. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2009.148002>
- Миклаш, Р., Дронов, А. (2006). Палеоихнологія – введення в изучение ископаемых следов жизнедеятельности. Прага.
- Москвин, М.М., Найдин, Д.П. (1960). Датские и пограничные с ними отложения Крыма, Закаспийской области и юго-восточной части Русской платформы. В *Граница меловых и третичных отложений*. Москва: Издательство АН СССР, 15–40.
- Москвин, М.М., Шиманская, Н.В. (1993). Род *Echinocorys* (морские ежи) в отложениях датского яруса восточной части Европейской палеобиогеографической области. Статья 2. *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*, 68 (2), 44–59.
- Муліка, А.М. (1971). Верхня крейда. Стратиграфія УРСР. Т. VIII. Крейда. Київ, 177–197.
- Найдин, Д.П. (1960). Датские и монские отложения. *Сборник в честь академика Иовчо Смиловича Иовчева*. София, 167–184.
- Найдин, Д.П., Беньямовский, В.Н. (2000). О ярусном делении палеоцена. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 8 (4), 65–83.
- Пастернак, С.И. (1973). Крейдові серпуліди Європейської частини СССР. Київ: Наукова думка.
- Пославская, Н.А., Москвин, М.М. (1960). Морские ежи отряда *Spatangoida* в датских и пограничных с ними отложениях Крыма, Кавказа и Закаспийской области. В *Граница меловых и третичных отложений*. Москва: Издательство АН СССР, 47–82.
- Радкевич, Г.О. (1900). О нижнетретичных отложениях окрестностей Канева. *Записки Киевского общества естествоиспытателей*, 16 (2), 1–45.
- Селин, Ю.И. (1964). Стратиграфия и моллюски олигоцена Больше-Томского марганцевородного района. Москва: Недра.
- Стратиграфічний кодекс України. (2012). Київ.
- Супрун, І.С. (2021). Біостратиграфія палеоценових відкладів Українських Карпат за нанопланктоном. *Дис. ... канд. геол. наук: 04.00.09 – Палеонтологія і стратиграфія*. Київ.
- Триколиди, Ф.А., Голубев, В.К. (2017). Комплексы эласмобранхий (Chondrichthyes, Elasmobranchii) из маастрихтских и датских отложений Крыма. *Материалы LXIII сессии Палеонтологического общества "Интегративная палеонтология: перспективы развития для геологических целей"*, 3–7 апреля 2017 г., Санкт-Петербурга, 220–221.
- Удовиченко, Н.И. (2013). Палеогеновые комплексы акуловых рыб Крыма и их значение для стратиграфии. *Материалы Международной научной конференции "Стратиграфия осадочных образований верхнего протерозоя и фанерозоя", 23–26 сентября 2013 г., Киев*, 147–148.
- Чернышев, Б.И. (1949). Подкласс Malacostraca. Отряд Decapoda. Десятиногие. Атлас руководящих форм ископаемой фауны СССР. Т. XII. Палеоген. Москва: Государственное издательство геологической литературы, 289–294.
- Шевченко, Т.В. (2016). Характеристика регіональних стратонів палеоцену Північної України за органікостінним мікрофитопланктоном. *Проблеми обґрунтування регіональних стратонів фанерозою України: Матеріали XXXVII сесії Палеонтологічного товариства НАН України, Київ*, 73–76.
- Шиманский, В.Н. (1975). Меловые наутилоидеи. Москва: Наука.
- Шишлов, С.Б., Дубкова, К.А., Аркадьев, В.В. и др. (2020). Мел и палеоген бассейна реки Бодрак (Юго-Западный Крым). Санкт-Петербург.
- Янин, Б.Т. (1978). Ископаемые следы жизнедеятельности организмов в меловых и палеогеновых отложениях Крыма. *Труды XX сессии Всесоюзного палеонтологического общества*. Душанбе: Дониш, 173–185.
- Янин, Б.Т., Барабошкин, Е.Ю. (2013). Горы *Thalassinoides* (структуры зарывания десятиногих ракообразных) из нижнемеловых отложений Юго-западного и Центрального Крыма. *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 21 (3), 1–11. <https://doi.org/10.7868/S0869592X13030101>
- Ярцева, М.В. (1973). Характеристика комплексів бентосних фораминіфер дату та палеоцену стратотипових розрізів Бахчисарайського району. *Тектоніка і стратиграфія*, 6, 33–40.
- Ahyong, S.T., Lai, J.C.Y., Sharkey, D., Colgan, D.J., Ng, P.K.L. (2007). Phylogenetics of the brachyuran crabs (Crustacea: Decapoda): the status of Podotremata based on small subunit nuclear ribosomal RNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 45, 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2007.03.022>
- Akhmetev, M.A., Beniamovski V.N. (2006). The Paleocene and Eocene in the Russian part of West Eurasia. *Stratigrafiya. Geologicheskaya Korrelyatsiya*, 14 (1), 54–78. <https://doi.org/10.1134/S0869593806010047>
- Collins, J.S.H. (2010). New species of crabs (Crustacea, Decapoda), one from the Middle Danian of Denmark, and three new species from the Upper Cretaceous of Nigeria. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 36, 13–19. <https://doi.org/10.1080/14772019.2016.1182950>
- Collins, J.S.H., Jakobsen, S.L. (1994). A synopsis of the biostratigraphic distribution of the crab genera (Crustacea, Decapoda) of the Danian (Palaeocene) of Denmark and Sweden. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 21, 35–46.
- De Carvalho, C.N., Viegas, P.A., Cachao, M. (2007). Thalassinoides and its producer: populations of the Mecochirus buried within their burrow system, Boca do Chapim Formation (Lower Cretaceous), Portugal. *PALAIOS*, 22, 107–112. <https://doi.org/10.2110/palo.2006.p06-011r>
- Dieni, I. (2010). Maastrihtian and Selandian decapod crustaceans from Sardinia. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 49 (2), 135–144.
- Droser, M.L. (1991). Ichnofabric of the Paleozoic Skolithos Ichnofacies and the nature and distribution of Skolithos pipercock. *PALAIOS*, 6 (3), 316–325.
- Eichwald, E. (1865–1868). Lethaea Rossica ou paleontologie de la Russie. Vol. 2. Periode moyenne. Stuttgart: Schweizerbart.
- Förster, R. (1968). *Paraneocarcinus libanoticus* n. sp. (Decapoda) und die Entwicklung der Calappidae in der Kreide. *Mitteilungen der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Historische Geologie*, 8, 167–195.

- Förster, R. (1970). Zwei neue brachyure Krebse aus dem Paläozän des Haunsberges nördlich von Salzburg. *Mitteilungen der bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und historische Geologie*, 10, 241–252.
- Fraaije, R.H.B., Jagt, J.W.M., Van Bakel, B.W.M., Tshudy, D.M. (2018). New lobsters (Decapoda, Nephropoidea) from the Cretaceous–Paleogene section of the Middle Vistula valley, east-central Poland. *Acta Geologica Polonica*, 68 (4), 503–509. <https://doi.org/10.1515/agp-2018-0014>
- Fraaye, R.H.B. (1994). Early Paleocene crabs (Crustacea, Decapoda) from the Middle Vistula Valley, Central Poland. *Acta geologica polonica*, 44, 261–266.
- Jäger, M. (1993). Danian Serpulidae and Spirorbidae from NE Belgium and SE Netherlands: K/T boundary extinction, survival, and origination pattern. *Contribution to Tertiary and Quaternary Geology*, 29, 73–137.
- Jagt, J.W.M., Collins, J.S.H., Fraaye, R.H.B. (1993). A new early Palaeocene genus of raninid crab (Crustacea, Decapoda) from Denmark, southern Sweden and The Netherlands. *Contributions to Tertiary and Quaternary Geology*, 30 (3/4), 177–182.
- Jakobsen, S.L., Collins, J.S.H. (1997). New Middle Danian species of anomurid and brachyuran crabs from Fakse, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 44, 89–110.
- Jakobsen, S.L., Feldmann, R.M. (2004). Epibionts on *Dromiopsis rugosa* (Decapoda: Brachyura) from the Late Middle Danian limestones at Fakse Quarry, Denmark: novel preparation techniques yield amazing results. *Journal of Paleontology*, 78 (5), 953–960. [https://doi.org/10.1666/0022-3360\(2004\)078<0953:EODRDB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0022-3360(2004)078<0953:EODRDB>2.0.CO;2)
- Jakobsen, S.L., Fraaije, R.H.B., Jagt, W.M., Van Bakel, W.M. (2020). New early Paleocene (Danian) paguroids from deep-water coral/bryozoan mounds at Fakse, eastern Denmark. *Geologija*, 63 (1), 47–56. <https://doi.org/10.5474/geologija.2020.005>
- Latreille, P.A. (1802). Histoire Naturelle, Générale et Particulière des Crustacés et des Insectes. Ouvrage Faisant suite à l'Histoire Naturelle Générale et Particulière, Composée par LeClerc de Buffon, et Rédigée par C.S. Sonnini, Membre de Plusieurs Sociétés Savantes. Vol. 3. Paris: Dufart.
- Nielsen, K.B. (1917). Cerithiumkalken i Stevns Klint. *Danmarks Geologiske Undersøgelser*, 4. Række 1 (7), 1–14.
- Rindsberg, A.K. (2018). Ichnotaxonomy as a science. *Annales Societas Geologorum Polonicae*, 88, 91–110. <https://doi.org/10.14241/asgp.2018.012>
- Robin, N., Van Bakel, B.W.M., Pacaud, J.-M., Charbonnier, S. (2017). Decapod crustaceans from the Paleocene (Danian) of the Paris Basin (Vigny stratotype and allied localities) and a limpet palaeoassociation. *Journal of Systematic Palaeontology*, 15 (4), 257–273. <https://doi.org/10.1080/14772019.2016.1182950>
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M. (2005). Decapods, the Cretaceous–Palaeocene boundary, and recovery. In S. Koenemann, R.A. Jenner (Eds.), *Crustacea and arthropod relationships. Crustacean issues*, 16, 17–53. <https://doi.org/10.1201/9781420037548.ch2>
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M., Karasawa, H., Luque, J. (2018). Systematic description: section Raninoida. *Treatise online. Part R (revised)*, 1 (8S), 1–44.
- Schweitzer, C.E., Karasawa, H., Luque, J., Feldmann, R.M. (2016). Phylogeny and classification of Necrocarinoidea Förster, 1968 (Brachyura: Raninoida) with description of two new genera. *Journal of Crustacean biology*, 36 (3), 338–372. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002216>
- Segerberg, K.O. (1900). De Anomura och Brachyura dekapoderna inom Skandinavien Yngre krita. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 22 (5), 1–42.
- Seilacher, A. (1967). Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5, 413–428.
- Verhoff, J.R., Müller, P.M., Feldmann, R.M., Schweitzer, C. E. (2009). A new species of Tumidocarcinidae (Decapoda, Carpilioidea) from the Kambühel Formation (Paleocene) of Austria. *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien A*, 111, 225–232.
- ### References
- Ahyong, S.T., Lai, J.C.Y., Sharkey, D., Colgan, D.J., Ng, P.K.L. (2007). Phylogenetics of the brachyuran crabs (Crustacea: Decapoda): the status of Podotremata based on small subunit nuclear ribosomal RNA. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 45, 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2007.03.022>
- Akhmet'ev, M.A., Beniamovski V.N. (2006). The Paleocene and Eocene in the Russian part of West Eurasia. *Stratigrafiya. Geologicheskaya Korrelyatsiya*, 14 (1), 54–78. <https://doi.org/10.1134/S0869593806010047>
- Amitrov, O.V. (1987). Paleogenovyye morya Ukrainy kak svyazuyushcheye zveno mezhdru moryami Severo-Zapadnoy Yevropy i Yuga SSSR (na materiale bryukhonoigkikh mollyuskov). In: *Biostatigrafiya, paleontologiya osadochnogo chekhla Ukrainy*. Kiev, 148–152. [in Russian]
- Andryeyeva-Hryhorovych, A.S., Hnylko, O.M., Hnylko, S.R. (2012). Mezha kreydy-paleohenu u vidkladakh Vezhans'koho pokryvu (zona Mammaros'kykh skel') Vnutrishnikh Ukrayins'kykh Karpat. *Paleontolohichni doslidzhennya v udoskonalenni stratygrafichnykh skhem fanerozoys'kykh vidkladiv: Materialy XXXIV sesiji Paleontolohichnoho tovarystva NAN Ukrainy*. Kyiv, 66–67. [in Ukrainian]
- Andryeyeva-Hryhorovych, A.S., Maslun, N.V., Ivannik, M.M., ta in. (2017). Kaynozoy'ska istoriya paleobaseyniv Ukrayins'kykh Karpat. *40 rokiv Paleontolohichnoho tovarystva Ukrainy. Materialy XXXVIII sesiji Paleontolohichnoho tovarystva NAN Ukrainy*. Kyiv, 103–105. [in Ukrainian]
- Baraboshkin, E.Yu., Guzhikov, A.YU., Aleksandrova, G.N. et al., (2020). New sedimentological, magnetostratigraphic and biostratigraphic data on Campanian-Maastrichtian of the Beshkosh Mountain, south-west Crimea. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 28 (6), 125–170. <https://doi.org/10.31857/S0869592X20060046> [in Russian]
- Benyamovskiy, V.N. (2003). Prolivy, vodnyye massy, techeniya i paleobiogeograficheskoye rayonirovaniye morskikh basseynov paleotsena Severo-Zapadnoy Yevrazii po foraminiferam. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskiiy*, 78 (4), 56–77. [in Russian]
- Benyamovskiy, V.N. (2009). Dneprovsko-Donetskiy basseyn kak svyazuyushcheye zveno mezhdru moryami Severo-Zapadnoy Yevrazii (po materialam paleotsenovykh bentosnykh foraminifer). *Collection of scientific works of the IGS NAS of Ukraine*, 207–211. [in Russian]
- Benyamovskiy, V.N. (2013). Foraminiferal palaeobiogeography in the medium and high latitudes Paleocene Northern Eurasia marine areas. In: *Stratigraphy of the early XXI century – tendencies and new ideas*, 145–167. [in Russian]
- Birshteyn, Ya.A. (1960). Otryad Decapoda. Osnovy paleontologii. T. 8. Chlenistonogiye, trilobitoobraznyye i rakooobraznyye. Moskva: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo literatury po geologii i okhrane nedr, 439–456. [in Russian]
- Chernyshev, B.I. (1949). Podklass Malacostraca. Otryad Decapoda. Desyatinogiye. In: *Atlas rukovodyashchikh form iskopayemoy fauny SSSR. T.XII. Paleogen*. Moskva: Gosudarstvennoye izdatel'stvo geologicheskoy literatury, 289–294. [in Russian]
- Collins, J.S. (2010). New species of crabs (Crustacea, Decapoda), one from the Middle Danian of Denmark, and three new species from the Upper Cretaceous of Nigeria. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 36, 13–19. <https://doi.org/10.1080/14772019.2016.1182950>
- Collins, J.S.H., Jakobsen, S.L. (1994). A synopsis of the biostratigraphic distribution of the crab genera (Crustacea, Decapoda) of the Danian (Palaeocene) of Denmark and Sweden. *Bulletin of the Mizunami Fossil Museum*, 21, 35–46.
- Dernov, V., Udovychenko, M. (2016). Deyaki paleohenovi nautyloideyi Donbasu ta Krymu. *Paleontolohichnyy zbirnyk*, 48, 19–27. [in Ukrainian]
- Dernov, V.S. (2019). Novi dani shchodo systematichnoho skladu pizn'okreydovykh i paleohenovykh nautyloid Donbasu ta Krymu. *Problemy heolohiyi fanerozooyu Ukrayiny: Materialy X Vseukrayins'koyi naukovoï konferentsiyi, 9-11 zhovtnya 2019 r., Lviv*, 33–35. [in Ukrainian]
- Dieni, I. (2010). Maastrichtian and Selandian decapod crustaceans from Sardinia. *Bollettino della Società Paleontologica Italiana*, 49 (2), 135–144.
- Droser, M.L. (1991). Ichnofabric of the Paleozoic Skolithos Ichnofacies and the nature and distribution of Skolithos piperock. *PALAIOS*, 6 (3), 316–325.
- Dubkova, K.A., Shishlov, S.B., Cherepakina, A.B. (2019). Razrez Section of the Paleocene-Eocene in the region of the Ak-Kaya Mountain (Central Crimea) and its geohistorical interpretation. *Vestnik of Saint-Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (1), 4–23. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.101> [in Russian]
- Eichwald, E. (1865-1868). Lethaea Rossica ou paleontologie de la Russie. Vol. 2. Periode moyenne. Stuttgart: Schweizerbart.
- Förster, R. (1968). *Paranecrocarinus libanoticus* n. sp. (Decapoda) und die Entwicklung der Calappidae in der Kreide. *Mitteilungen der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Historische Geologie*, 8, 167–195.
- Förster, R. (1970). Zwei neue brachyure Krebse aus dem Paläozän des Haunsberges nördlich von Salzburg. *Mitteilungen der bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und historische Geologie*, 10, 241–252.
- Fraaije, R.H.B., Jagt, J.W.M., Van Bakel, B.W.M., Tshudy, D.M. (2018). New lobsters (Decapoda, Nephropoidea) from the Cretaceous–Paleogene section of the Middle Vistula valley, east-central Poland. *Acta Geologica Polonica*, 68 (4), 503–509. <https://doi.org/10.1515/agp-2018-0014>
- Fraaye, R.H.B. (1994). Early Paleocene crabs (Crustacea, Decapoda) from the Middle Vistula Valley, Central Poland. *Acta geologica polonica*, 44, 261–266.
- Generalova, L.V., Kostyuk, O.V. (2012). Sedimentological features of the Cretaceous-Eocene multi-colored horizons of Skypova structural-facial zone of the Ukrainian Carpathians. *Collection of Scientific works of the IGS NAS of Ukraine*, 5, 89–94. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2012.147544> [in Ukrainian]
- Gorbach, L.P. (1956). O nakhodkakh krabov v menilitovykh slantsakh Vostochnykh Karpat. *Geologicheskiiy sbornik L'vovskogo geologicheskogo obshchestva*, 2/3, 30–42. [in Russian]
- Gorbach, L.P. (1972). Stratigrafiya i fauna mollyuskov rannego paleotsena Kryma. Moskva: Nedra. [in Russian]
- Gorbach, L.P. (1975). Paleotsen po dannym izucheniya mollyuskov iz krymskikh razrezov. *Paleontologicheskiiy sbornik*, 12, 106–111. [in Russian]
- Gorbach, L.P., Dobrovol'skaya, T.I. (1964). O nizhnemelovykh paleoseymicheskikh yavleniyakh v Krymu. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 154 (3), 500–502. [in Russian]
- Gryaznov V.I. (1956). O priurochennosti nakhodok kraba *Coeloma vigil* M.-Edw. k oligotsenovym margantsevorudnym fatsiyam. *Doklady AN SSSR*, 106 (4), 717–719. [in Russian]
- Il'in, I.V. (2005). Melovyye i paleogenovyye desyatinogiye rakooobraznyye (Crustacea: Decapoda) zapadnoy chasti Severnoy Yevrazii. Moskva: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta. [in Russian]
- Jäger, M. (1993). Danian Serpulidae and Spirorbidae from NE Belgium and SE Netherlands: K/T boundary extinction, survival, and origination pattern. *Contribution to Tertiary and Quaternary Geology*, 29, 73–137.
- Jagt, J.W.M., Collins, J.S.H., Fraaye, R.H.B. (1993). A new early Palaeocene genus of raninid crab (Crustacea, Decapoda) from Denmark, southern Sweden and The Netherlands. *Contributions to Tertiary and Quaternary Geology*, 30 (3/4), 177–182.

- Jakobsen, S.L., Collins, J.S.H. (1997). New Middle Danian species of anomuran and brachyuran crabs from Fakse, Denmark. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 44, 89–110.
- Jakobsen, S.L., Feldmann, R.M. (2004). Epibionts on *Dromiopsis rugosa* (Decapoda: Brachyura) from the Late Middle Danian limestones at Fakse Quarry, Denmark: novel preparation techniques yield amazing results. *Journal of Paleontology*, 78 (5), 953–960. [https://doi.org/10.1666/0022-3360\(2004\)078<0953:EODRDB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1666/0022-3360(2004)078<0953:EODRDB>2.0.CO;2)
- Jakobsen, S.L., Fraaije, R.H.B., Jagt, W.M., Van Bakel, W.M. (2020). New early Paleocene (Danian) paguroids from deep-water coral/bryozoan mounds at Fakse, eastern Denmark. *Geologija*, 63 (1), 47–56. <https://doi.org/10.5474/geologija.2020.005>
- Kopayevich, L.F., Lygina, Ye.A., Yakovishina, Ye.V. et al. (2010). Datskiye otlozheniya Krymskogo poluostrova: fatsial'nyye osobennosti i usloviya nakopleniya. *Moscow University Geology Bulletin*, 5, 12–20. [in Russian]
- Korobkov, I.A. (1975). Desyatinogiy rakooobraznyye. In: Stratigrafiya SSSR. Paleogenovaya sistema. Moskva: Nedra, 433–435. [in Russian]
- Kuz'micheva, Ye.I. (1987). Melovyye i paleogenovyye korally Ukrainy. In: Biostratigrafiya, paleontologiya osadochnogo chekhla Ukrainy. Kiev: Naukova dumka, 143–147. [in Russian]
- Latreille, P.A. (1802). Histoire Naturelle, Générale et Particulière des Crustacés et des Insectes. Ouvrage Faisant suite à l'Histoire Naturelle Générale et Particulière, Composée par LeClerc de Buffon, et Rédigée par C.S. Sonnini, Membre de Plusieurs Sociétés Savantes. Vol. 3. Paris: Dufart.
- Levitskiy, Ye.S. (1974). Iskopyemyye desyatinogiy rakooobraznyye okrestnostey Bakhchisaraya. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskoy, XLIX* (6), 101–119. [in Russian]
- Likharev, B.K. (1917). Ostatki krabov iz nizhnnetretichnykh otlozheniy Pridonetskogo kraya. *Yezhegodnik Russkogo paleontologicheskogo obshchestva*, 1, 13–24. [in Russian]
- Lygina, Ye.A., Nikishin, A.M., Tveritina, T.Yu. et al. (2019a). Eotsenovyye paleoseysmodislokatsii gory Ak-kaya (Belogorskiy rayon, Krym). *Moscow University Geology Bulletin*, 1, 46–56. <https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-1-46-56> [in Russian]
- Lygina, Ye.A., Ustinova, M.A., Gabdullin, R.R. i dr. (2019b). Pogranichnyye maastrikht-datskiye otlozheniya Tsentral'nogo Kryma: novyye dannyye o izvestkovom nannoplanktone. *Moscow University Geology Bulletin*, 1, 68–79. [in Russian]
- Makarenko, D.Ye. (1956). Reshtky krabiv iz paleohenovyykh vidkladiv Krymu. *Geolohichnyy Zhurnal*, XVI (3), 74–76. [in Ukrainian]
- Makarenko, D.Ye. (1963). Deyaki novi ta malovidomi vydy molyuskiv iz paleohenovyykh vidkladiv URSS. *Geolohichnyy Zhurnal*, XXIII (4), 90–99. [in Ukrainian]
- Makarenko, D.Ye. (1973). Mors'ki vidklady paleotsenu Konks'ko-Yalyn'skoyi zapadyny. *Tektonika i stratyografiya*, 6, 45–49. [in Ukrainian]
- Maslakova, N.I., Nguyen van Ngok. (1975). Rasprostraneniye bentosnykh foraminifer v pogranichnykh otlozheniyakh mela i paleogena Yugo-Zapadnogo Kryma. In: Razvitiye i smena organicheskogo mira na rubezhe mezozoya i kaynozoya. Novyye o faune. Moskva: Nauka, 7–14. [in Russian]
- Maslakova, N.I., Voloshina, A.M. (1969). Melovaya sistema. Verkhniy otdel. In: Geologiya SSSR. T. VIII. Krym. Chast' 1. Geologicheskoye opisanie. Moscow: Nedra, 114–155. [in Russian]
- Maslun, N.V., Ivanik, M.M. (2009). Paleotsenovi vidklady Ukrayins'koho shchyta ta osoblyvosti sedimentatsiy paleotsenovoho morya Arkanhel's'koho. *Zbirnyk naukovykh prats' Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrainy*, 199–206. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2009.148002>
- Mikulash, R., Dronov, A. (2006). Paleoiikhologiya – vvedeniye v izucheniye iskopayemykh sledov zhiznedeyatel'nosti. Praga. [in Russian]
- Moskvin, M.M., Naydin, D.P. (1960). Datskiye i pogranichnyye s nimi otlozheniya Kryma, Zakaspiyskoy oblasti i yugo-vostochnoy chasti Russkoy platformy. In: Granitsa melovykh i tretichnykh otlozheniy. Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR, 15–40. [in Russian]
- Moskvin, M.M., Shmanskaya, N.V. (1993). Rod *Echinocorys* (morskiye yezhi) v otlozheniyakh datskogo yarusu vostochnoy chasti Yevropeyskoy paleobiogeograficheskoy oblasti. Stat'ya 2. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytateley prirody. Otdel geologicheskoy*, 68 (2), 44–59. [in Russian]
- Mulika, A.M. (1971). Verkhnyaya kreyda. In: Stratyografiya URSS. T. VIII. Kreyda. Kyiv, 177–197. [in Ukrainian]
- Naydin, D.P. (1960). Datskiye i monsiye otlozheniya. *Sbornik v chest' akademika Yovcho Smilovicha Yovcheva*, Sofiya, 167–184. [in Russian]
- Naydin, D.P., Ben'yamovskiy, V.N. (2000). O yarusnom delenii paleotsena. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 8 (4), 65–83. [in Russian]
- Nielsen, K.B. (1917). Cerithiumkalken i Stevns Klint. *Danmarks Geologiske Undersøgelser*, 4. Række 1 (7), 1–14.
- Pasternak, S.I. (1973). Kreydovi serpulidy Yevropeys'koyi chastyny SSSR. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]
- Poslavskaya, N.A., Moskvin, M.M. (1960). Morskiye yezhi otriyada Spatangoida v datskikh i pogranichnykh s nimi otlozheniyakh Kryma, Kavkaza i Zakaspiyskoy oblasti. In: Granitsa melovykh i tretichnykh otlozheniy. Moskva: Izdatel'stvo AN SSSR, 47–82. [in Russian]
- Radkevich, G.O. (1900). O nizhnnetretichnykh otlozheniyakh okrestnostey Kaneva. *Zapiski Kiyevskogo obshchestva yestestvoispytateley*, 16 (2), 1–45. [in Russian]
- Rindsberg, A.K. (2018). Ichnotaxonomy as a science. *Annales Societas Geologorum Poloniae*, 88, 91–110. <https://doi.org/10.14241/asgp.2018.012>
- Robin, N., Van Bakel, B.W.M., Pacaud, J.-M., Charbonnier, S. (2017). Decapod crustaceans from the Paleocene (Danian) of the Paris Basin (Vigny stratotype and allied localities) and a limpet palaeoassociation. *Journal of Systematic Palaeontology*, 15 (4), 257–273. <https://doi.org/10.1080/14772019.2016.1182950>
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M. (2005). Decapods, the Cretaceous-Palaeogene boundary, and recovery. In: S. Koenemann, R.A. Jenner (Eds.) Crustacea and arthropod relationships. *Crustacean issues*, 16, 17–53. <https://doi.org/10.1201/9781420037548.ch2>
- Schweitzer, C.E., Feldmann, R.M., Karasawa, H., Luque, J. (2018). Systematic description: section Raninoida. *Treatise online. Part R (revised)*, 1 (8S), 1–44.
- Schweitzer, C.E., Karasawa, H., Luque, J., Feldmann, R.M. (2016). Phylogeny and classification of Necrocarinoidea Förster, 1968 (Brachyura: Raninoida) with description of two new genera. *Journal of Crustacean biology*, 36 (3), 338–372. <https://doi.org/10.1163/1937240X-00002216>
- Seegerberg, K.O. (1900). De Anomura och Brachyura dekapoderna inom Skandinavien Yngre krita. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 22 (5), 1–42.
- Seilacher, A. (1967). Bathymetry of trace fossils. *Marine Geology*, 5, 413–428.
- Selin, YU.I. (1964). Stratigrafiya i molyuski oligotsena Bol'she-Tokmakskogo margantsevorudnogo rayona. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Shevchenko, T.V. (2016). Kharakterystyka rehional'nykh stratoniv paleohenu Pivnichnoyi Ukrainy za orhanikostinnykh mikrofitoplanktonom. *Problemy obgruntuvannya rehional'nykh stratoniv fanerozooy Ukrainy: Materialy XXXVII sesiyi Paleontolohichnoho tovarystva NAN Ukrainy*, Kyiv, 73–76. [in Ukrainian]
- Shimanskiy, V.N. (1975). Melovyye nautiloidy. Moskva: Nauka. [in Russian]
- Shishlov, S.B., Dubkova, K.A., Arkad'yev, V.V. i dr. (2020). Mel i paleogen basseyna reki Bodrak (Yugo-Zapadnyy Krym). Sankt-Peterburg. [in Russian]
- Stratigraphichnyi kodeks Ukrainy. (2012). Kyiv. [in Ukrainian]
- Suprun, I.S. (2021). Biostratigrafiya paleotsenovykh vidkladiv Ukrayins'kykh Karpat za nannoplanktonom. *Thesis ... Cand. Sci. (Geol.): 04.00.09*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Trikolidi, F.A., Golubev, V.K. (2017). Kompleksy elasmobranchiy (Chondrichthyes, Elasmobranchii) iz maastrikhtskikh i datskikh otlozheniy Kryma. *Integrativnaya paleontologiya: perspektivy razvitiya dlya geologicheskikh tseley: Materialy LXIII sessiyi Paleontologicheskogo obshchestva, 3-7 aprelya 2017, Sankt-Peterburg*, 220–221. [in Russian]
- Udovichenko, N.I. (2013). Paleogenovyye kompleksy akulovykh ryb Kryma i ikh znacheniye dlya stratigrafii. *Stratigrafiya osadochnykh obrazovaniy verkhnego proterozoya i fanerozooya: Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, 23–26 sentyabrya 2013, Kiev*, 147–148. [in Russian]
- Verhoff, J.R., Müller, P.M., Feldmann, R.M., Schweitzer, C. E. (2009). A new species of Tumidocarinidae (Decapoda, Carpilioidea) from the Kambühl Formation (Paleocene) of Austria. *Annalen des Naturhistorischen Museums in Wien A*, 111, 225–232.
- Voronina, A.A. (1989). Paleogenovaya sistema. In: Geologicheskoye stroeniye Kachinskogo podnyatiya Gomogo Kryma. Moscow, 4–35. [in Russian]
- Vyalov, O.S., Gorbach, L.P. (1982). Znacheniye pozmnelovyykh i paleogenovykh ustrits dlya stratigrafii i mezhregional'noy korrelyatsii (na primere Kryma). *Sovremennoye znacheniye paleontologii dlya stratigrafii: Trudy XXIV sessiyi Vsesoyuznogo paleontologicheskogo obshchestva*. Leningrad: Nauka, 98–103. [in Russian]
- Yanin, B.T. (1978). Iskopyemyye sledy zhiznedeyatel'nosti organizmov v melovykh i paleogenovykh otlozheniyakh Kryma. *Voprosy tafonomii i paleobiologii: Trudy XX sessiyi Vsesoyuznogo paleontologicheskogo obshchestva*. Dushanbe: Donish, 173–185. [in Russian]
- Yanin, B.T., Baraboshkin, Ye.Yu. (2013). Nory *Thalassinoides* (struktury zaryvaniya desyatinogikh rakooobraznykh) iz nizhnemelovykh otlozheniy Yugo-zapadnogo i Tsentral'nogo Kryma. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 21 (3), 1–11. <https://doi.org/10.7868/S0869592X13030101> [in Russian]
- Yartseva, M.V. (1973). Kharakterystyka kompleksiv bentosnykh foraminifer datu ta paleotsenu stratotipovykh rozriv Bakhchysarays'koho rayonu. *Tektonika i stratyografiya*, 6, 33–40. [in Ukrainian]
- Zernets'kyy, B.F. (2017). Paleotsenovi numulity Ukrainy. 40 rokiv *Paleontolohichnomu tovarystvu Ukrainy: Materialy XXXVIII sesiyi Paleontolohichnoho tovarystva NAN Ukrainy*. Kyiv, 111–112. [in Ukrainian]
- Zernets'kyy, B.F., Ryabokon', T.S., Lyul'yeva, S.A. (2014). Pytannya vyvchennya osadovoho kompleksu paleotsenu Kryms'koho i Kerchens'koho pivostroviv. *Collection of scientific works of the IGS NAS of Ukraine*, 7, 101–125. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2014.146861> [in Ukrainian]
- Zernets'kyy, B.F., Ryabokon', T.S., Lyul'yeva, S.A. (2015). Pytannya vyvchennya osadovoho kompleksu eotsenu Kryms'koho i Kerchens'koho pivostroviv. *Collection of scientific works of the IGS NAS of Ukraine*, 8, 32–62. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2014.146861> [in Ukrainian]
- Zosymovych, V.YU., Shevchenko, T.V. (2015). Paleohenu vidklady Pivnichnoukrayins'koyi paleosedymental'synoyi provintsiyi. *Zbirnyk naukovykh prats' Instytutu heolohichnykh nauk NAN Ukrainy*, 8, 68–121. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2015.146712> [in Ukrainian]
- Zosymovych, V.YU., Shevchenko, T.V. (2016). Pro zminy do rehioyarusnoyi shkaly paleohenu Pivnichnoyi Ukrainy. *Problemy obgruntuvannya rehional'nykh stratoniv fanerozooy Ukrainy: Materialy XXXVII sesiyi Paleontolohichnoho tovarystva NAN Ukrainy*. Kyiv, 71–73. [in Ukrainian]
- Zosymovych, V.YU., Zernets'kyy, B.F., Andreyeva-Hryhorovych, A.S. et al. (2005). Rehioyarusy paleohenu platformnoyi Ukrainy. *Collection of scientific works of the IGS NAS of Ukraine*, 118–132. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 21.12.22

V. Dernov, PhD Student,
e-mail: vitalydernov@gmail.com,
Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine,
55 b O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine;

M. Udovychenko, PhD (Geol.-Min.), Associate Prof.,
e-mail: triakis26@gmail.com,
Luhansk Taras Shevchenko National University,
3 Koval' Str., Poltava, 36007, Ukraine

FIRST RECORD OF THE GENUS *ARCTICOCARCINUS* SHWEITZER ET AL., 2016 (DECAPODA: BRACHYURA) IN THE DANIAN OF THE CRIMEA (UKRAINE) AND ITS PALEOBIOGEOGRAPHIC SIGNIFICANCE

*The Paleogene decapod crustaceans of Ukraine are insufficiently studied. This group of arthropods has not attracted much attention of researchers, despite the fact that the remains of decapods are known in the Paleogene sediments of the Dnipro River area, Donetsk Basin, the Crimea and the Ukrainian Carpathians. The article describes the first find of a decapod crustacean of the genus *Arcticocarcinus* Schweitzer et al, 2016 in Ukraine. The fossil comes from the lower part of the Danian of the Crimea (Ak-kaya Section near the Bila Skelia, Bilogirsk District). The fossil was found in situ in the decapod burrow *Thalassinoides* Ehrenberg, 1944. Such finds allow us to establish which fossil decapod crustaceans produced burrows *Ophiomorpha*, *Thalassinoides*, and *Spongeliomorpha*. Sediments with crab remains were accumulated in the environment of *Skolithos* ichnofacies. This ichnofacies is usually confined to areas of the seabed whose sediments are constantly mixed by waves. There was a cold-water paleobasin on the territory of modern northern Ukraine in the Danian Age. This basin was connected to the Western European paleobasin and the Boreal paleobasin. The southern basin, located in the Carpathians, the Black Sea Depression, and the Crimea, was much warmer and closely connected with the Mediterranean Basin. A representative of the genus *Arcticocarcinus* was first found outside Sweden. It is very unlikely that the genus *Arcticocarcinus* Schweitzer et al, 2016 entered modern Sweden from the Crimea or vice versa via the Polish Channel, as the Carpathian flysch basin was obviously a barrier. Apparently, the exchange of fauna took place through the Dnipro-Donetsk Sea and the Pripjat Strait. These basins were part of the so-called "Sea of Arkhangelskyi" (a large sublatitudinal basin that stretched from the spurs of the Caucasus and the Urals to Western Europe). *Arcticocarcinus* cf. *insignis* (Segerberg, 1900) expands the paleontological characteristics of the Danian of Crimea and testifies to the free exchange of benthic faunas of North-Western Europe and Crimea.*

Keywords: decapod crustaceans, Paleogene, Danian, the Crimea, *Arcticocarcinus*.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.02>С. Вижва, д-р геол. наук, проф.
e-mail: s.vyzhva@knu.uaВ. Онищук, канд. геол. наук, доц.
e-mail: viktor.onyshchuk@knu.uaІ. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: ivan.onyshchuk@knu.uaМ. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.
e-mail: mvreva@gmail.comО. Шабатура, д-р геол. наук, доц.
e-mail: oshabatura@knu.uaКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна**ЕЛЕКТРИЧНІ І ПРУЖНІ ПАРАМЕТРИ УЩІЛЬНЕНИХ ТЕРИГЕННИХ ПОРІД КЕМБРІЮ
СХІДНОГО СХИЛУ ЛЬВІВСЬКОГО ПАЛЕОЗОЙСЬКОГО ПРОГИНУ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. Орлюком М.І.)**Присвячено висвітленню результатів дослідження електричних і пружних параметрів ущільнених теригенних порід кембрію східного схилу Львівського палеозойського прогину.**Метою досліджень є визначення петрофізичних параметрів ущільнених порід-колекторів (алевролітів і пісковиків) та комплексного аналізу їх фізичних властивостей. Досліджені електричні і пружні характеристики теригенних порід: питомий і відносний електричний опір, параметр збільшення електричного опору, швидкість позовдовжніх хвиль та інтервальный час за атмосферних і пластових умов.**Комплексним аналізом даних лабораторних електрометричних досліджень установлені кореляційні зв'язки між питомим електричним і відносним електричним опором, а також між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором ущільнених порід в атмосферних і пластових умовах. Залежність між питомим та відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення електричних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.**У результаті комплексного аналізу матеріалів акустичних досліджень для досліджених порід установлено кореляційні зв'язки: швидкостей пружних хвиль та інтервального часу з густиною та коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між швидкостями позовдовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах; між швидкістю й коефіцієнтом пористості в пластових умовах. Залежність між швидкістю позовдовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення пружних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.**Кореляційні залежності електричних і пружних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями алевролітів і ущільнених пісковиків, отримані за результатами лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин на нових перспективних площах східного схилу Львівського палеозойського прогину.**Ключові слова: питомий електричний опір, відносний електричний опір, швидкість пружних хвиль, кореляційні залежності, алевроліти, ущільнені пісковики.*

Постановка проблеми. Ущільнені колектори часто містять значну кількість органіки й можуть слугувати як материнськими породами, так і колекторами газу. Поклади вуглеводнів в ущільнених колекторах посідають особливе місце серед нетрадиційних джерел видобутку нафти та газу. Вони представлені слабопроникними, низькопористими гірськими породами (Михайлов та ін., 2014, 2015, 2018). Ущільнені колектори за цілою низкою ознак відрізняються від порід традиційних родовищ нафти та газу, їм властиве регіональне поширення. Значні поклади газу характерні для центральних, найбільш занурених частин нафтогазових басейнів ("газ центрально-басейнового типу"). У багатьох регіонах світу, у тому числі на Волино-Поділлі (Україна), встановлені нетрадиційні поклади вуглеводнів в ущільнених колекторах (газ ущільнених порід, сланцевий газ тощо). Сучасний розвиток новітніх технологій видобутку газу на основі гідророзриву пласта у продуктивному інтервалі геологічного розрізу дозволяє добувати газ у значних обсягах з багатих органікою ущільнених порід. Геофізичні та петрофізичні дослідження, а також математичне моделювання є важливою частиною технології, на основі яких визначаються

напрямки горизонтального стовбура свердловини гідророзриву і його параметри.

У статті висвітлено електричні і пружні параметри ущільнених порід, представлених низькопористими пісковиками та алевролітами кембрію східного схилу Львівського палеозойського прогину. Характеристика петрофізичних властивостей цих порід є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ ущільнених колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Дослідженню фізичних властивостей порід нафтогазоперспективних регіонів України присвячений ряд публікацій (Вижва та ін., 2012, 2013, 2014а, б, 2017, 2018, 2019а, б, 2020а, б, 2021а, б, 2022а, б, в; Vyzhva, 2017; Карпенко та ін., 2014, 2015; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014; Орлюк, 2011, 2013; Orlyuk, 2018; Рибалка та Карпенко, 2016; Соболев та Карпенко, 2021; Тектоника..., 2015; Садівник, 2013) та багатьох інших авторів. Як вже зазначалось, електричні і пружні параметри порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин. Відомо, що електричні і пружні

параметри порід та їхні кореляційні зв'язки із фільтраційно-ємнісними властивостями мають досить виражений індивідуальний характер щодо окремих різновидів порід та кожної ділянки досліджень. Отже, лабораторні дослідження цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків між ними для кожної перспективної площі потребують окремого публічного висвітлення їхніх результатів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Проблема пошуків і розвідки нетрадиційних джерел вуглеводнів на території України є надзвичайно актуальною. Оцінка перспективності геологічних структур і комплексів на наявність природного газу передбачає визначення їх геолого-геометричних та економічних параметрів, а також петрофізичних властивостей гірських порід (у тому числі електричних і пружних). З використанням останніх виконується оцінка колекторських властивостей порід за матеріалами електричних і акустичних методів досліджень свердловин. Слід відзначити, що для ряду перспективних площ практично відсутні дані результатів лабораторних акустичних та електрометричних досліджень ущільнених порід, а також їхніх кореляційних залежностей від фільтраційно-ємнісних параметрів.

Метою досліджень є оцінка електричних і акустичних параметрів ущільнених теригенних порід кембрію перспективних на вуглеводні ділянок східного схилу Львівського палеозойського прогину як основи комплексного аналізу їх фізичних параметрів та встановлення кореляційних зв'язків із фільтраційно-ємнісними властивостями. Слід відзначити, що кореляційні зв'язки між фільтраційно-ємнісними параметрами і даними свердловинних та польових геофізичних методів є досить складними і потребують ретельного вивчення. Це вимагає застосування комплексу лабораторних петрофізичних досліджень. Отримані в результаті лабораторних досліджень дані (фільтраційно-ємнісні параметри і густина порід, швидкість поширення пружних хвиль у них, їх питомий електричний опір та кореляційні зв'язки між цими петрофізичними характеристиками) використовуються для інтерпретації результатів електрометричних і акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки і сейсморозвідки.

Експериментальні дослідження виконано в НДЛ теоретичної і прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка. Комплекс петрофізичних досліджень включав визначення: густини порід; відкритої та ефективно пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах (Вижва та ін., 2019б, 2020б, 2021б, 2022б). Усі лабораторні вимірювання виконувалися відповідно до чинних нормативних документів.

У статті наведено результати комплексних досліджень електричних і пружних параметрів колекції із 80 зразків ущільнених порід кембрію – пісковиків (67 зразків) і алевролітів (13 зразків) східного схилу Львівського палеозойського прогину, площі: Бучачська (інтервал глибин 1453–1811 м); Володимирська (2189–2525 м); Добротвірська (3236–3702 м); Лудинська (2760–3110 м); Ліщинська (3003–3222 м); Сокальська (2525–2609 м); Сушнівська (2408–2562 м). Досліджені породи представлені пісковиками тонкозернистими, дрібнозернистими і середньозернистими, сірими та світло-сірими, а також алевролітами сірими.

Методика акустичних та електрометричних лабораторних досліджень. Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керна виконані за допомогою цифрового тераомметра С.А.6547. Прилад дозволяє

виконувати високоточні вимірювання електричного опору на постійному струмі за двоелектродною схемою в діапазоні від 10 кОм до 10 МОм із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (Вижва та ін., 2012–2014, 2019б–2021б; Вижва, 2017). Для вимірювання зразків, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl, мінералізація 90–120 г/л), застосовувався цифровий прецизійний RCL-метр МНС-1100. Лабораторні циліндричні зразки під час вимірювання поміщались у спеціальний кернотримач, розроблений у НДЛ теоретичної і прикладної геофізики, що дозволяє стандартизувати умови вимірювань лабораторних зразків.

Лабораторні вимірювання швидкостей поширення пружних хвиль у гірських породах виконувались ультразвуковим імпульсно-фазовим методом (Продайвода, 2004, 2007). Для лабораторних акустичних досліджень застосовувалась установка "Керн-4", розроблена в НДЛ теоретичної і прикладної геофізики за участі фахівців механіко-математичного факультету КНУ імені Тараса Шевченка. Вимірювання швидкості пружних хвиль здійснювалося на спеціально виготовлених циліндричних зразках.

Виконано дослідження зміни питомого електричного опору й швидкості пружних хвиль за різного ступеня відгонки води на центрифугі ОС-6М (Породи..., 1985; Рудько, 2005), з метою визначення залежності цих параметрів від ступеня водонасичення порід. Водночас виконано серію вимірювань електричного опору й швидкості пружних хвиль зразків порід, насичених моделлю пластової води, до їх центрифугування та після центрифугування за режимів відгонки від 1000 до 6000 об/хв із кроком 1000 об/хв, що відповідає діапазону зміни тиску витіснення води від 0 до 1 МПа (7 циклів вимірювань). Також паралельно визначалися коефіцієнти водонасичення порід.

Для встановлення кореляційного зв'язку між електричними та швидкісними параметрами порід в атмосферних і пластових умовах виконано відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах (температура $t = 60 - 100$ °С; ефективний тиск $p_{\text{еф}} = 26 - 45$ МПа; мінералізація пластової води $M = 90 - 120$ г/л).

Середня відносна похибка визначення електричного опору порід у рамках виконаних досліджень становила 3,0 %, а швидкості пружних хвиль – 2,5 %.

Аналіз даних електрометричних досліджень. Електричні параметри ущільнених порід-колекторів перспективних на вуглеводні ділянок східного схилу Львівського палеозойського прогину визначено за допомогою лабораторних вимірювань. Дані про межі змін та середні значення яких наведено в табл. 1.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що питомий електричний опір (ПЕО) мінерального скелета порід (ПЕО сухих екстрагованих зразків) змінюється: для алевролітів – від 2,988 кОм·м (алевроліт сірий) до 4,019 МОм·м (перешарування алевроліту з аргілітом) за середнього значення 452,465 кОм·м; для пісковиків – від 9,977 кОм·м (пісковик тонко-дрібнозернистий) до 31,590 МОм·м (пісковик світло-сірий, дрібнозернистий) за середнього значення 4,457 МОм·м. При насиченні моделлю пластової води (розчин NaCl) зразки порід мають ПЕО: алевроліти – від 12,7 Ом·м (алевроліт з аргілітом) до 73,2 Ом·м (алевроліт сірий) за середнього значення 28,1 Ом·м; а пісковики – від 7 Ом·м (пісковик світло-сірий, дрібно-середньозернистий) до 38,1 Ом·м (пісковик тонкозернистий) за середнього значення 16,9 Ом·м.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення електричних параметрів порід

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови		Пластові умови		
		Питомий електричний опір в атмосферних умовах, ρ , Ом·м		Відносний електричний опір, P	Питомий електричний опір порід в пластових умовах, $\rho_{пл}$, Ом·м	Відносний електричний опір, $P_{пл}$
		сухих	насичених розчином NaCl			
Алевроліти	мін.	2988	12,7	101	2,2	205
	макс.	4018636	73,2	630	12,2	2444
	сер.	452465	28,1	221	4,7	649
Пісковики	мін.	9977	7,0	34	0,6	66,7
	макс.	31590210	38,1	328	6,4	1062
	сер.	4456996	16,9	115	2,6	303,6

Відносний електричний опір порід (P) – відношення питомого опору повністю насиченої породи ($\rho_{пв}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_{в}$): $P = \rho_{пв} / \rho_{в}$ (Дахнов, 1975; Туаб, Доналдсон, 2009) є важливим інформаційним параметром, який широко використовують для геофізичних досліджень свердловин (ГДС) електрометричними методами. Виконаними електрометричними дослідженнями встановлено, що відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 101 (алевроліт сірий) до 630 (перешарування алевроліту з аргілітом) за середнього значення 221; для пісковиків – від 34 (піскови́к світло-сірий) до 328 (піскови́к тонкозернистий) за середнього значення 115.

Для досліджених порід встановлено кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) і відносним електричним опором (P), які апроксимуються рівнянням $P = a \cdot k_n^{-m}$, де a – постійний коефіцієнт, m – структурний показник (Дахнов, 1975; Туаб, Доналдсон, 2009). Ці залежності для досліджених порід описуються степеневими рівняннями:

$$P = 6,2641 \cdot k_n^{-0,821} \text{ при } R^2 = 0,93 \text{ – алевроліти;}$$

$$P = 6,6247 \cdot k_n^{-0,835} \text{ при } R^2 = 0,75 \text{ – пісковики.}$$

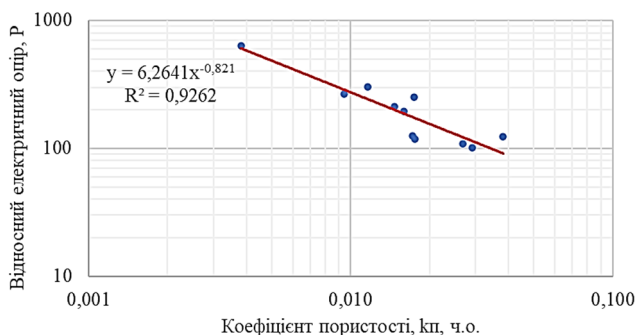
Графіки цих залежностей наведено на рис. 1.

Визначено також параметр збільшення електричного опору (P_n). Цей параметр характеризує відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{чв}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{пв}$): $P_n = \rho_{чв} / \rho_{пв}$ (Дахнов, 1975; Туаб, Доналдсон, 2009) і є важливою геоелектричною характеристикою порід-колекторів. У результаті експериментальних лабораторних досліджень на центрифугі ОС-6М і статистичного аналізу даних електрометричних вимірювань отримані кореляційні залежності параметра P_n від коефіцієнта водонасичення (k_b), які апроксимуються рівнянням $P_n = b \cdot k_b^{-n}$, де b – постійний коефіцієнт, n – показник змочуваності, що залежить від ступеня гідрофобності зерен породи (Дахнов, 1975; Туаб, Доналдсон, 2009). Ці залежності для досліджених порід описуються степеневими рівняннями:

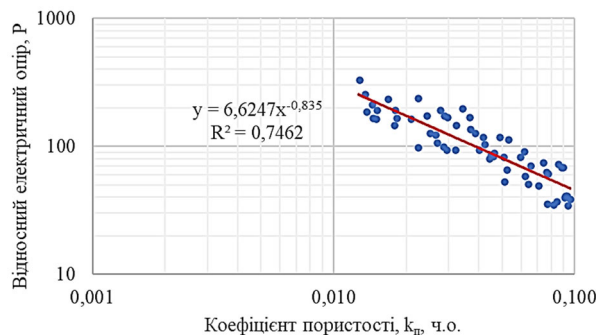
$$P_n = 1,1375 \cdot k_b^{-2,279} \text{ при } R^2 = 0,899 \text{ – алевроліти;}$$

$$P_n = 1,0812 \cdot k_b^{-1,298} \text{ при } R^2 = 0,838 \text{ – ущільнені пісковики.}$$

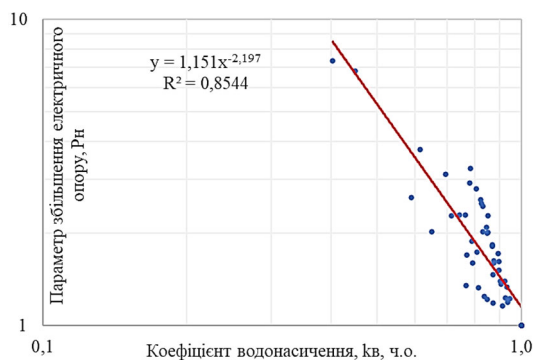
Графіки наведених залежностей представлено на рис. 2.



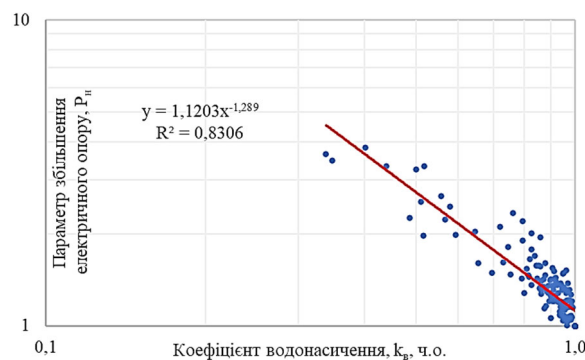
а



б

Рис. 1. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) та відносним електричним опором (P): а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

а



б

Рис. 2. Кореляційні залежності між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (k_b): а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

З метою визначення питомого та відносного електричного опорів порід у пластових умовах виконано комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000. Фізичне моделювання пластових умов виконувалось на зразках, насичених розчином NaCl. Середні значення і межі змін питомого й відносного електричного опору порід у пластових умовах ($t = 60 - 100^\circ\text{C}$; $p_{\text{эф}} = 26 - 45 \text{ МПа}$; $M = 90 - 120 \text{ г/л}$) наведено в табл. 1.

Закриття мікротріщин у породах та деформація в них порового простору призводить до зростання питомого електричного опору із збільшенням тиску від атмосферного до пластового. Але за збільшення температури від атмосферної до пластової опір порід зменшується. Отже, маємо суперпозицію впливу двох різнонаправлених факторів на питомий електричний опір порід у пластових умовах.

За результатами фізичного моделювання пластових умов встановлено, що питомий електричний опір

досліджених алевролітів у пластових умовах змінюється від 2,2 Ом·м до 12,2 Ом·м за середнього значення 4,7 Ом·м, а пісковиків – від 0,6 Ом·м до 6,4 Ом·м за середнього значення 2,6 Ом·м (табл. 1). Відносний електричний опір алевролітів у пластових умовах змінюється від 205 до 2444 за середнього значення 649, а пісковиків – від 66,7 до 1062 за середнього значення 303,6 (табл. 1).

Після комплексного аналізу даних лабораторних електрометричних вимірювань встановлено кореляційні залежності між питомими електричними опорами в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{\text{пл}}$) умовах (рис. 3), між відносними електричними опорами в атмосферних (P) і пластових ($P_{\text{пл}}$) умовах (рис. 4) та між відносними електричними опорами ($P_{\text{пл}}$) і коефіцієнтами пористості ($k_{\text{п,пл}}$) у пластових умовах (рис. 5).

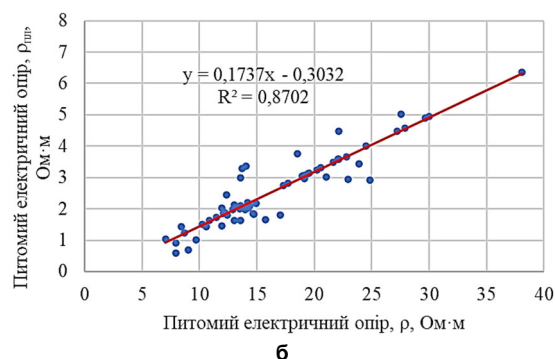
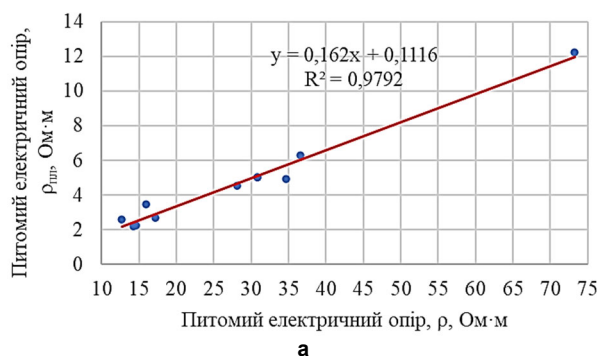


Рис. 3. Кореляційні залежності між питомим електричним опором порід в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{\text{пл}}$) умовах: а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

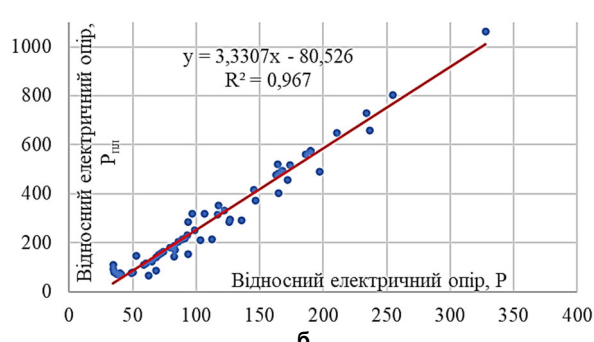
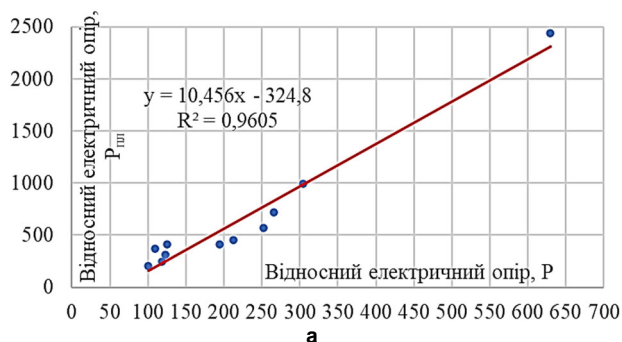


Рис. 4. Кореляційні залежності між відносним електричним опором порід в атмосферних (P) і пластових ($P_{\text{пл}}$) умовах: а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

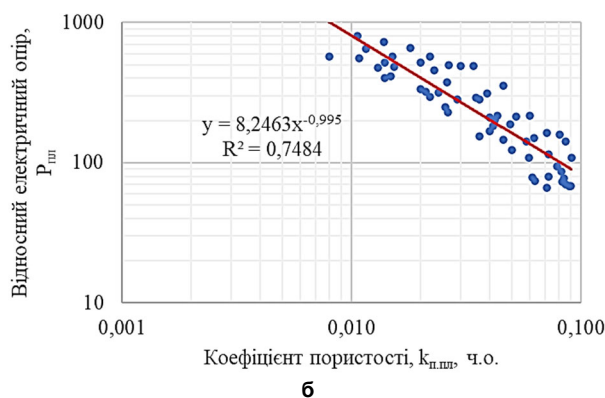
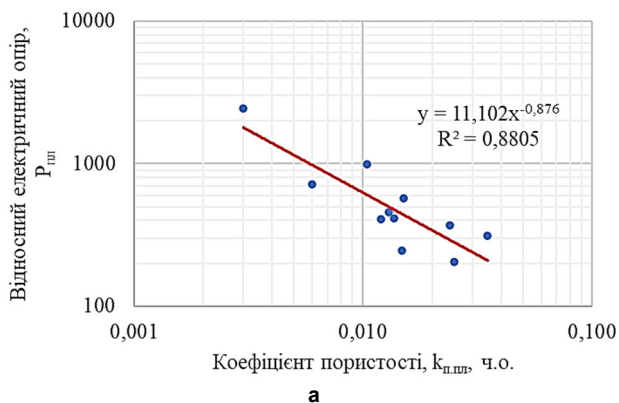


Рис. 5. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п,пл}}$) і відносним електричним опором ($P_{\text{пл}}$) порід (пластові умови): а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

Аналітичні вирази кореляційних залежностей, графіки яких зображено на рис. 3–5, наведено нижче:

$$\rho_{пл} = 0,162 \cdot \rho + 0,1116, \text{ при } R^2 = 0,979 - \text{алевроліти};$$

$$\rho_{пл} = 0,1737 \cdot \rho - 0,3022,$$

$$\text{при } R^2 = 0,87 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$P_{пл} = 10,456 \cdot P - 324,8, \text{ при } R^2 = 0,961 - \text{алевроліти};$$

$$P_{пл} = 3,3307 \cdot P - 80,526,$$

$$\text{при } R^2 = 0,967 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$P_{пл} = 11,102 \cdot k_{пл}^{-0,876}, \text{ при } R^2 = 0,881 - \text{алевроліти};$$

$$P_{пл} = 8,2463 \cdot k_{пл}^{-0,995},$$

$$\text{при } R^2 = 0,748 - \text{ущільнені пісковики}.$$

Слід відзначити, що кореляційні залежності між питомими та відносними електричними опорами в

атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійною функцією (рис. 3–4), а між відносним електричним опором і коефіцієнтом пористості – степеневою функцією (рис. 5).

Отримані залежності дозволяють за вимірними в атмосферних умовах електричними параметрами привести їх значення до пластових умов і використати для інтерпретації матеріалів електричних методів каротажу свердловин.

Результати лабораторних акустичних досліджень. Пружні параметри ущільнених порід-колекторів перспективних на вуглеводні ділянок східного схилу Львівського палеозойського прогину визначено за допомогою лабораторних вимірювань. Результати вимірювання швидкості позовдовжніх пружних хвиль наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Межі змін і середні значення швидкостей та інтервального часу позовдовжніх пружних хвиль порід

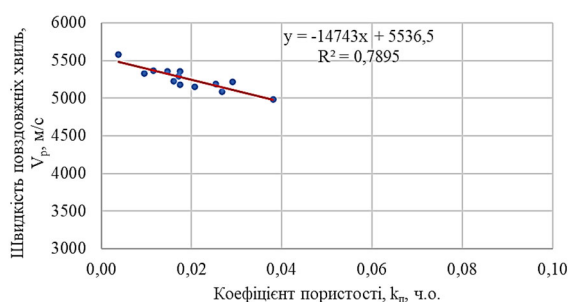
Породи	Значення параметра	Атмосферні умови				Пластові умови	
		Швидкість позовдовжніх хвиль, м/с		Інтервальний час, мс/м		Швидкість позовдовжніх хвиль, м/с	Інтервальний час, мс/м
		сухих	насичених розчином NaCl	сухих	насичених розчином NaCl		
Алевроліти	мін.	4710	4983	188	179	5208	176
	макс.	5333	5582	212	201	5690	192
	сер.	4943	5256	203	190	5500	182
Пісковики	мін.	3084	4172	184	179	4573	173
	макс.	5432	5590	324	240	5783	219
	сер.	4245	4898	240	205	5240	192

Акустичними лабораторними дослідженнями в атмосферних умовах встановлено, що в екстрагованих сухих алевролітах швидкість поширення позовдовжніх пружних хвиль змінюється від 4710 м/с (алевроліт з алевроитовим аргілітом) до 5333 м/с (алевроліт сірий) за середнього значення 4943 м/с, а інтервальний час – від 188 до 212 мс/м за середнього значення 203 мс/м. Швидкість поширення позовдовжніх пружних хвиль у пісковицях змінюється від 3084 м/с (пісковиц світло-сірий із зеленуватим відтінком) до 5432 м/с (пісковиц темно-сірий) за середнього значення 4245 м/с, а інтервальний час – від 184 до 324 мс/м за середнього значення 240 мс/м.

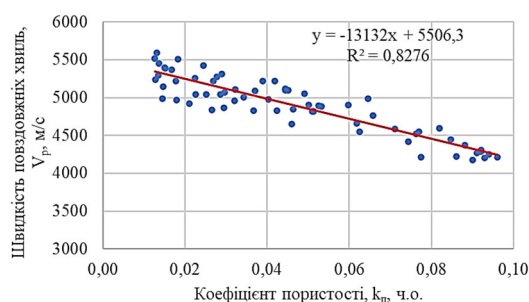
У насичених моделлю пластової води алевролітах швидкість позовдовжніх хвиль змінюється від 4983 м/с до

5582 м/с за середнього значення 5256 м/с, а інтервальний час – від 179 до 201 мс/м за середнього значення 190 мс/м. У насичених пісковицях швидкість позовдовжніх хвиль змінюється від 4172 м/с до 5590 м/с за середнього значення 4898 м/с, а інтервальний час – від 179 мс/м до 240 мс/м за середнього значення 205 мс/м.

За результатами аналізу акустичних досліджень, виконаних в атмосферних умовах, встановлено ряд кореляційних залежностей між швидкостями пружних хвиль (V_p) та інтервальним часом (t_p) і коефіцієнтом пористості (k_n) та густиною досліджених порід (δ), насичених розчином NaCl, графіки яких зображено на рис. 6–9. Ці залежності апроксимуються лінійною функцією.

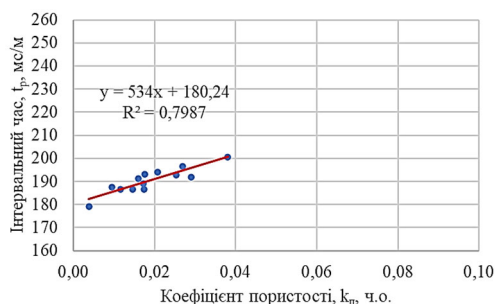


а

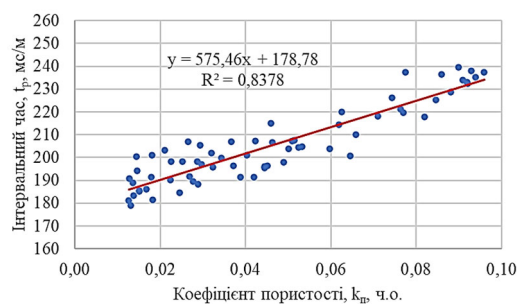


б

Рис. 6. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) і швидкістю позовдовжніх хвиль (V_p): а – алевроліти, б – ущільнені пісковики



а



б

Рис. 7. Кореляційні залежності між коефіцієнтом пористості (k_n) та інтервальним часом (t_p): а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

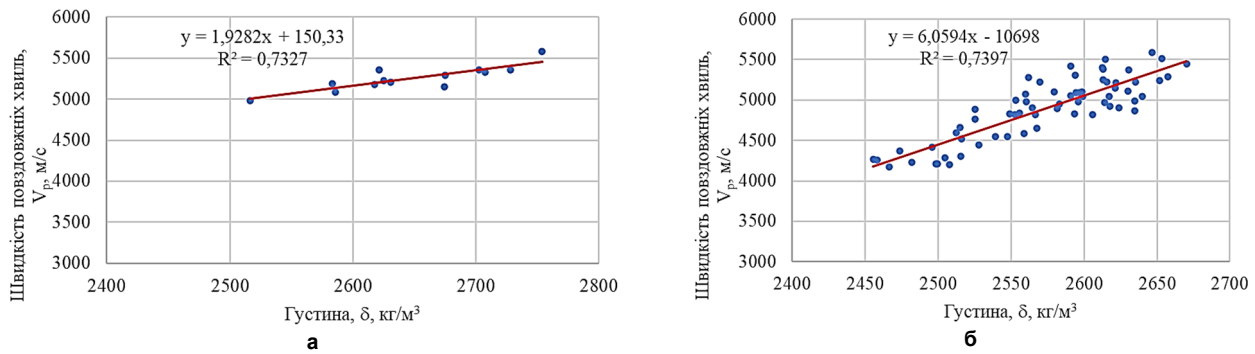


Рис. 8. Кореляційні залежності між густиною (δ) і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p):
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

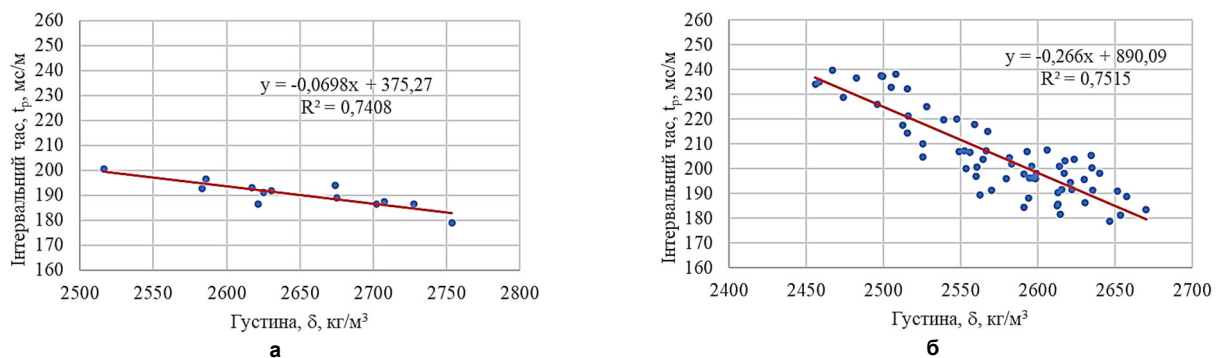


Рис. 9. Кореляційні залежності між густиною (δ) і інтервальним часом (t_p):
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

Нижче наведено аналітичні вирази встановлених кореляційних залежностей:

$$V_p = -14743 \cdot k_n + 5536,5, \text{ при } R^2 = 0,79 - \text{алевроліти};$$

$$V_p = -13132 \cdot k_n + 5506,5, \text{ при } R^2 = 0,828 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$t_p = 534 \cdot k_n + 180,24, \text{ при } R^2 = 0,8 - \text{алевроліти};$$

$$t_p = 575,46 \cdot k_n + 178,78, \text{ при } R^2 = 0,838 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$V_p = 1,9282 \cdot \delta + 150,33, \text{ при } R^2 = 0,733 - \text{алевроліти};$$

$$V_p = 6,0594 \cdot \delta - 10698, \text{ при } R^2 = 0,74 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$t_p = -0,0698 \cdot \delta + 375,27, \text{ при } R^2 = 0,741 - \text{алевроліти};$$

$$t_p = -0,266 \cdot \delta + 890,09, \text{ при } R^2 = 0,752 - \text{ущільнені пісковики}.$$

Шляхом фізичного моделювання на спеціалізованій установці високого тиску ВСЦ-1000 визначено швидкості поширення поздовжніх хвиль у пластових умовах $V_{p,пл}$. Дослідження виконувалися на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін та середні значення $V_{p,пл}$ та інтервального часу $t_{p,пл}$ порід у пластових умовах наведено в табл. 2.

У результаті цих досліджень встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль у досліджених породах зростає із збільшенням тиску. Це відбувається внаслідок деформації порового простору та закриття у породах мікротріщин. Швидкість поздовжніх хвиль у пластових умовах змінюється: для алевролітів – від 5208 м/с до 5690 м/с за середнього значення 5500 м/с, а інтервальний час – від 176 мс/м до 192 мс/м за середнього значення 182 мс/м. Швидкість поздовжніх хвиль пісковиків змінюється від 4573 м/с до 5783 м/с за середнього значення 5240 м/с, а інтервальний час – від 173 мс/м до 219 мс/м за середнього значення 192 мс/м (табл. 2).

За результатами комплексного аналізу матеріалів лабораторних акустичних досліджень досліджених порід, встановлено кореляційні залежності між швидкістю поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах (рис. 10), а також між коефіцієнтом пористості ($K_{п,пл}$) і швидкістю пружних хвиль ($V_{p,пл}$) та інтервальним часом ($t_{p,пл}$) у пластових умовах (рис. 11, 12), які виражаються лінійними функціями.

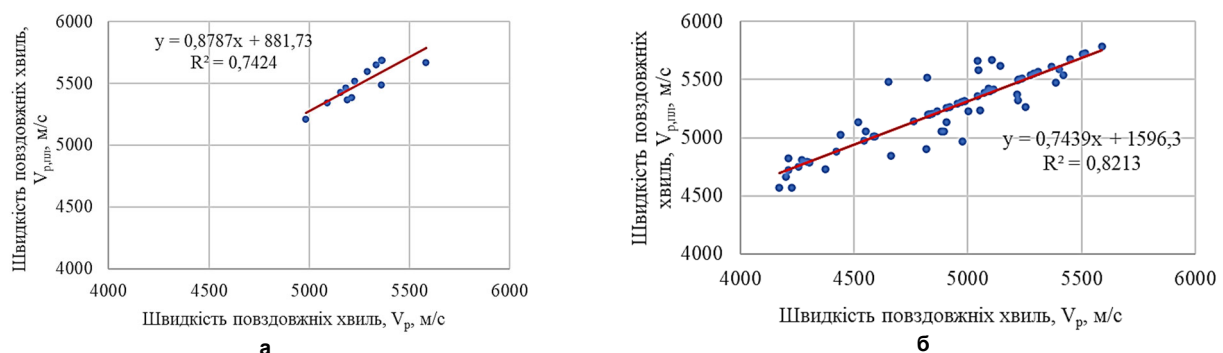


Рис. 10. Кореляційна залежність між швидкістю поздовжніх хвиль в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах:
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

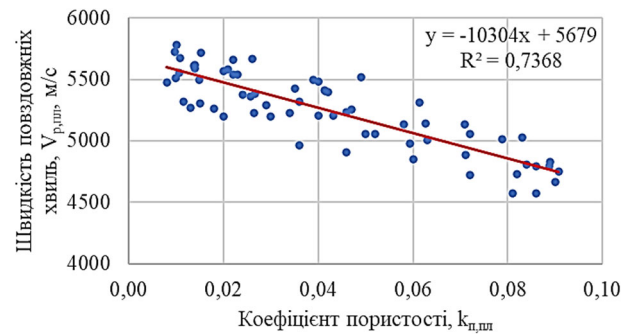
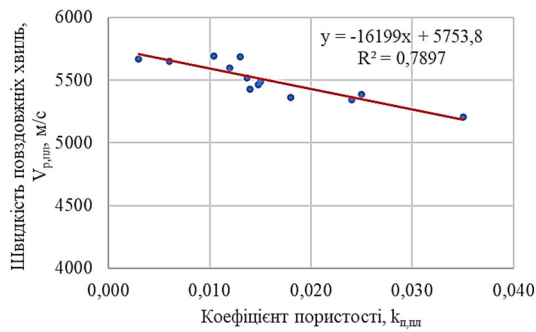


Рис. 11. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й швидкістю поздовжніх хвиль ($V_{п,пл}$) у пластових умовах:
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

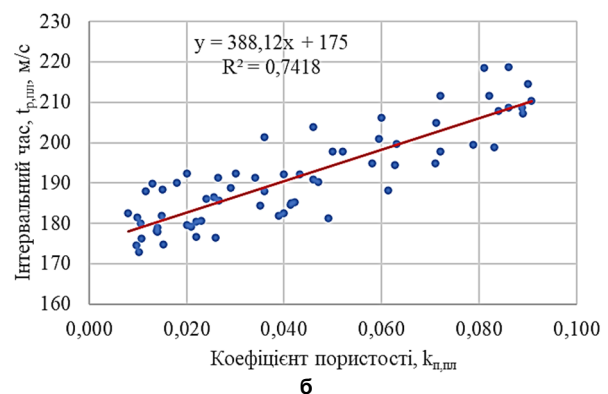
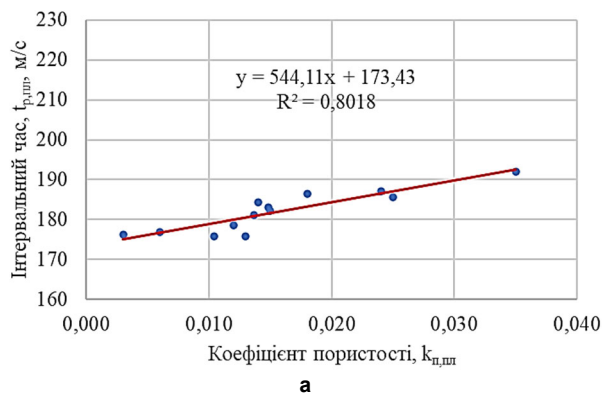


Рис. 12. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й інтервального часу ($t_{п,пл}$) у пластових умовах:
а – алевроліти, б – ущільнені пісковики

Нижче наведено аналітичні вирази встановлених кореляційних залежностей:

$$V_{п,пл} = 0,8787 \cdot V_p + 881,73, \text{ при } R^2 = 0,742 - \text{алевроліти};$$

$$V_{п,пл} = 0,739 \cdot V_p + 1596,3, \text{ при } R^2 = 0,821 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$V_{п,пл} = -16199 \cdot k_{п,пл} + 5753,8, \text{ при } R^2 = 0,79 - \text{алевроліти};$$

$$V_{п,пл} = -10304 \cdot k_{п,пл} + 5679, \text{ при } R^2 = 0,737 - \text{ущільнені пісковики};$$

$$t_{п,пл} = 544,11 \cdot k_{п,пл} + 173,43, \text{ при } R^2 = 0,802 - \text{алевроліти};$$

$$t_{п,пл} = 388,12 \cdot k_{п,пл} + 175, \text{ при } R^2 = 0,742 - \text{ущільнені пісковики}.$$

Отримані залежності дозволяють за вимірними в атмосферних умовах швидкісними параметрами привести їх значення до пластових умов і використати для інтерпретації матеріалів акустичного каротажу свердловин.

Висновки. У статті наведено результати комплексних досліджень петрофізичних властивостей колекції із 80 зразків ущільнених порід (пісковиків і алевролітів) кембрію, відібраних на 7 пошукових площах східного схилу Львівського палеозойського прогину в інтервалах глибин від 1453 м до 3702 м. Досліджені породи представлені пісковиками тонкозернистими, дрібнозернистими і середньозернистими, сірими та світло-сірими, а також алевролітами сірими.

Електрометричними лабораторними дослідженнями в атмосферних умовах установлено, що питомий електричний опір мінерального скелета (опір сухих екстрагованих порід) змінюється: для алевролітів – від 2,988 кОм·м до 4,019 МОм·м (середнє 452,465 кОм·м); для пісковиків – від 9,977 кОм·м до 31,590 МОм·м (середнє 4,457 МОм·м). Значні межі змін питомого опору зразків пояснюються неоднорідностями у структурі і текстурі порід (пористість,

наявність глинистих і піщаних прошарків та включень). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової води, змінюється: для алевролітів – від 12,7 до 73,2 Ом·м (середнє 28,1 Ом·м); для пісковиків – від 7 до 38,1 Ом·м (середнє 16,9 Ом·м). За середніми значеннями опорів алевроліти і пісковики суттєво не відрізняються.

Відносний електричний опір порід змінюється: для алевролітів – від 101 до 630 (середнє 221); для пісковиків – від 34 до 328 (середнє 115). Встановлена кореляційна залежність між відносним електричним опором і коефіцієнтом пористості, яка апроксимується степеневою функцією.

У результаті проведених електрометричних досліджень способом центрифугування зразків порід встановлено кореляційну залежність між параметром збільшення електричного опору і коефіцієнтом водонасичення, яка апроксимується степеневою функцією.

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що питомий електричний опір змінюється: для алевролітів – від 2,2 до 12,2 Ом·м (середнє 4,7 Ом·м); для пісковиків – від 0,6 до 6,4 Ом·м (середнє 2,6 Ом·м). Вимірювання питомого опору порід за різних тисків показали, що внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає зі збільшенням тиску, при цьому залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору від тиску для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку. Однак збільшення температури в пластових умовах призводить до зворотного процесу – опір зменшується. Відносний електричний опір порід у пластових умовах змінюється: для алевролітів – від 205 до 2444 (середнє 649); для пісковиків – від 66,7 до 1062 (середнє 303,6).

Комплексним аналізом даних електрометричних досліджень установлені кореляційні залежності між питомим електричним і відносним електричним опором, а також між коефіцієнтом пористості й відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах. Залежність між питомим та відносним електричним опором в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення електричних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.

За результатами акустичних вимірювань в атмосферних умовах установлено, що швидкість поширення поздовжніх хвиль у сухих екстрагованих породах змінюється: для алевролітів – від 4710 до 5333 м/с (середнє 4943 м/с), а інтервальний час – від 188 до 212 мс/м (середнє 203 мс/м); для пісковиків – від 3084 до 5432 м/с (середнє 4245 м/с), а інтервальний час – від 184 до 324 мс/м (середнє 240 мс/м). Швидкість поздовжніх хвиль порід насичених моделлю пластової води змінюється: для алевролітів – від 4983 до 5582 м/с (середнє 5256 м/с), а інтервальний час – від 179 до 201 мс/м (середнє 190 мс/м); для пісковиків – від 4172 до 5590 м/с (середнє 4898 м/с), а інтервальний час – від 179 до 240 мс/м (середнє 205 мс/м).

Фізичним моделюванням пластових умов установлено, що швидкість поздовжніх хвиль змінюється: для алевролітів – від 5208 до 5690 м/с (середнє 5500 м/с), а інтервальний час – від 176 до 192 мс/м (середнє 182 мс/м); для пісковиків – від 4573 до 5783 м/с (середнє 5240 м/с), а інтервальний час – від 173 до 219 мс/м (середнє 192 мс/м). Із зростанням тиску швидкість поздовжніх хвиль збільшується внаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом 2 порядку.

У результаті комплексного аналізу матеріалів акустичних досліджень для алевролітів і пісковиків установлено кореляційні зв'язки: між швидкостями пружних хвиль і густиною та коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між швидкостями поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах; між швидкістю й коефіцієнтом пористості в пластових умовах. Залежність між швидкістю поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражається лінійною функцією. Фізичне моделювання пластових умов дозволяє адаптувати значення пружних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що перебувають у пластових умовах.

Кореляційні залежності електричних та пружних і параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями алевролітів і щільних пісковиків, отримані за результатами лабораторних петрофізичних досліджень, можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин на нових перспективних площах східного схилу Львівського палеозойського прогину.

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

Список використаних джерел

- Вижва С.А., Онищук В.І., Онищук І.І., Рева М.В., Шабатура О.В. (2022б). Електричні і пружні властивості глибокозанурених ущільнених порід карбону центрального грабена ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (97), 29–38. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.04>
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.

Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014а). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157.

Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014б). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 65, 3–35.

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019б). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160.

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 83, 30–37.

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019а). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 85, 37–45.

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В., Олійник, О.В. (2020а). Фільтраційно-ємнісні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04>

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2020б). Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського нафтогазового району ДДЗ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>

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

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

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

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

Вижва, С.А., Онищук, Д.І., Онищук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 57, 13–16.

Вижва С.А., Михайлов В.А., Онищук І.І. (2017). Петрофізические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79, 12–20.

Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазоносности пород. Недра, 343 с.

Карпенко, О., Башкіров, Г., Карпенко, І. (2014). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(66), 71–76. DOI: [10.17721/1728-2713.66.12](http://doi.org/10.17721/1728-2713.66.12)

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

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

Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Загітнюк, В.М. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Книга IV. ВПЦ "Київський університет", 430 с.

Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геофизический журнал*, 35, 2, 127–136.

Орлюк, М.І., Пашкевич, І.К. (2011). Магнитная характеристика и разломная тектоника земной коры Шебелинской группы газовых месторождений как составная часть комплексных поисковых критериев углеводородов. *Геофизический журнал*, 33, 6, 136–151.

Орлюк, М.І. (2001). Магнітна модель земної кори Центральної депресії Дніпровсько-Донецької западини у зв'язку з прогнозуванням її нафтогазоносності. *Теоретичні та прикладні проблеми нафтогазової геофізики*, 62–66.

- Породы горные. (1985). Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2-85. Москва: Миннео СССР, 18 с.
- Продайвода, Г.Т. (2004). Акустика текстур гірських порід. Київ: ВГЛ "Обрії", 144 с.
- Продайвода, Г.Т. (2007). Математичне моделювання ефективних термомпружних властивостей багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища насиченого флюїдом з внутрішнім тиском. *Геофизический журнал*, 3, 122–130.
- Рибалка, С., Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості теригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 56–59. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>
- Рудько, Г.І., Нестеренко, М.Ю. та ін (2005). Обґрунтування кондиційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів теригенних порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. Київ; Львів, 58 с.
- Садівник, М.І., Федоришин, Д.Д., Трубенко, С.Д., Федоришин, С.Д. (2013). Вплив пластового тиску на електричні параметри гірських порід. XII Міжнародна конференція "Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти", Київ, Україна.
- Соболь, В., Карпенко, О. (2021). Нова модель проникності теригенних гранулярних колекторів на прикладі турнейських відкладів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1 (92), 61–66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09>
- Старостенко, В.И., Русаков, О.М. (2015). Тектоника и углеводородный потенциал кристаллического фундамента Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Галактика, 212 с.
- Тиаб, Дж., Дональдсон, Э.Ч. (2009). Петрофизика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. "Премииум Инжиниринг", 868 с.
- Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V., Onyshchuk, I.I., Solodkyi, I.V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhiv'skiy oil-and-gas region. *Геодинаміка*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>
- Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, D.I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *Nafta-Gaz: Rok LXXIII Nr 2*, 90–96. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03
- ### References
- Dakhnov, V.N. (1975). Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Karpenko, O., Bashkurov, G., Karpenko, I. (2014) Geophysical data: Estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(66), 71–76. DOI: 10.17721/1728-2713.66.12 [in Ukrainian]
- Karpenko, O., Mykhailov, V., Karpenko, I. (2015). Eastern Dnieper-Donetsk depression: Predicting and developing hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 68, 49–54. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.68.09.49-54> [in Ukrainian]
- Maslov, B., Onyshchuk, I., Shynkarenko, A. (2017). Modelling of nonlinear viscoelastic properties of terrigenous-calcareous sandstones. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 99–05. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13> [in Ukrainian]
- Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagnitko, V.M. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Orlyuk, M.I. (2001). Magnetic model of the earth's crust of Central depression of Dnieper-Donetsk depression in connection with prognostication of its oil and gas potential. *The theoretical and applied problems of oil and gas geophysics*, 62–66. [in Ukrainian]
- Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donetsk depression. *Geofizicheskii Zhurnal*, 35, 2, 127–136. [in Russian]
- Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V., Onyshchuk, I.I., Solodkyi, I.V. (2018). The association of physical properties of deep reservoirs with geomagnetic field and fault-block tectonics in the Glyns'ko-Solokhiv'skiy oil-and-gas region. *Geodynamics*, 2 (25), 71–88. DOI: <https://doi.org/10.23939/jgd2018.02.071>
- Orlyuk, M.I., Pashkevich, I.K. (2011). Magnetic characteristics and fault tectonics of the earth's crust of the Shebelinskaya group of gas fields as an integral part of complex search criteria for hydrocarbons. *Geofizicheskii Zhurnal*, 33, 6, 136–151. [in Russian]
- Prodayvoda, G.T. (2004). Acoustics textures of rocks. Kyiv: Horizons., 144 p. [in Ukrainian]
- Prodayvoda, G.T. (2007). Mathematical modeling of effective thermoelastic properties of the multi-fractured geological environment saturated with fluid internal pressure. *Geophysical Journal*, 3, 122–130. [in Russian]
- Rudko, G.I., Nesterenko, M.Yu., et al. (2005). Substantiating of the conditioning data of the reservoir parameters of terrigenous reservoirs for calculation of hydrocarbon reserves. Methodology guidelines. Kyiv-Lviv: UkrDHR.
- Rybalka, S., Karpenko, O. (2016). Central part of the Dnieper-Donetsk Basin: Reservoir properties of deep-laid terrigenous rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(72), 56–59. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08> [in Ukrainian]
- Sadivnik, M., Fedoryshyn, D., Trubenko, O., Fedoryshyn, S. (2013). Influence of Formation Pressure on the Electrical Characteristics of Rocks. *12th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Kiev, Ukraine*. [in Ukrainian]
- Sobol, V., Karpenko, O. (2021). A new model of permeability of terrigenous granular reservoirs on the example of turney deposits of Yablunivske oil and gas condensate field of the Dnieper-Donetsk basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(92), 61–66. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09> [in Ukrainian]
- Starostenko, V.I., Rusakov, O.M. (2015). Tectonics and hydrocarbon potential of the crystalline basement of the Dnieper-Donetsk depression. Kyiv: Galaktika, 212 p. [in Russian]
- The rocks. (1985). Methods for determination of reservoir properties. Method for determination of absolute permeability coefficient under stationary and non-stationary filtration. GOST 26450.2–85. Moscow: Mingeo USSR. [in Russian]
- Tiab, D., Donaldson, E.C. (2009). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport. Moscow: Premium Engineering. (Original work published 2004). [in Russian]
- Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, D., Onyshchuk, I. (2014). Reservoir Rocks in Impact Structures: Electrical Parameters. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 65, 31–35. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onyshchuk, I. (2017). Petrophysical features of Maikop series of the Crimean-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79, 12–20. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.02> [in Russian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, D., Onyshchuk, V. (2012). Petroelectrical investigations of reservoir rocks of Western-Shebelynske gas condensate field. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 57, 13–16. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Oliinyk, O., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Lower Permian carbonate deposits reservoir parameter softest part of Hlynko-Solokhiv'ska area of Dnieper-Donetsk depression gas-oil-bearing district. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1(88), 25–33. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.04> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Orlyuk, M., Drukarenko, V., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Petrophysical parameters of rocks of the Visean stage (Lokhvitsky zone of the Dnieper-Donetsk Basin). *Geofizicheskii Zhurnal*, 41, 2, 145–160. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchynska area of the Dnieper-Donetsk basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 83, 30–37. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Electrical parameters of the upper carbon rocks (Runovshchynska area of the Dnieper-Donetsk basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 85, 37–45. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Electrical and acoustic parameter softest Permian carbonate rocks (western part of the Hlynko-Solokhiv'skiy oil-and-gas-bearing district of the Dnieper-Donetsk basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (89), 49–58. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021). Porosity and permeability properties of consolidated rocks of the northern near edge zone of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (94), 37–45. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.94.04> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2022a). Reservoir properties of deep-seated consolidated rocks of Carboniferous period of the central graben of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (96), 11–19. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.96.02> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2022b). Electric and elastic properties of deep-seated consolidated rocks of Carboniferous period of the central graben of the Dnieper-Donetsk depression (DDD). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (97), 29–38. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.97.04> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2022b). Reservoir properties of consolidated terrigenous rocks of Cambrian period of the eastern slope of the Lviv Paleozoic depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (98), 33–41. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.98.04> [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Orlyuk, M., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2021). Electric and elastic parameters of carbonic period terrigenous rocks of the eastern part of the northern edge of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (95), 25–33. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.03> [in Ukrainian]

Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, D.I., Onyshchuk, I.I. (2013). Petrophysical parameters of unconventional types of reservoir rocks from Southern oil-and-gas region. *Geoinformatics*, 3 (47), 17–25. [in Ukrainian]
 Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onyshchuk, I.I. (2014). Petrophysical parameters of rocks from the areas of eastern sector of the Dnieper-Donetsk

depression promising for shale gas. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 36, 2, 145–157. [in Ukrainian]

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

Надійшла до редколегії 17.02.23

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
 e-mail: s.vyzhva@knu.ua

V. Onyshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
 e-mail: viktor.onyshchuk@knu.ua

I. Onyshchuk, PhD (Geol.), Senior Researcher
 e-mail: ivan.onyshchuk@knu.ua

M. Reva, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
 e-mail: mvreva@gmail.com

O. Shabatura, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.
 e-mail: dard@ukr.net

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
 Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ELECTRIC AND ELASTIC PROPERTIES OF CONSOLIDATED TERRIGENOUS ROCKS OF CAMBRIAN PERIOD OF THE SOUTHERN SLOPE OF THE LVIV PALAEOZOIC TROUGH

Paper concerned the research of elastic and electric properties of consolidated terrigenous rocks of Cambrian period of the southern slope of the Lviv Palaeozoic trough.

The purpose of the research was to study the petrophysical parameters of the consolidated reservoir rocks (siltstones and sandstones), as the basis of the integrated analysis of their physical properties. The research looked at electric and elastic parameters of terrigenous rock samples, resistivity and formation resistivity factor, formation resistivity enlargement factor, velocities of the P-waves and interval (transit) time in atmospheric and reservoir conditions.

Correlations between resistivity and formation resistivity factor, and between porosity and formation resistivity factor of consolidated rocks were established in atmospheric and reservoir conditions. The correlation between the resistivity and formation resistivity factor manifest itself in linear function. Physical modeling of reservoir conditions allows adapting the values of electrical parameters obtained in atmospheric conditions to parameters of rocks in reservoir conditions.

Laboratory acoustic study of rock samples managed to establish correlations of: velocities of the P-waves and interval (transit) time with density and porosity in atmospheric conditions; velocities of the P-waves in atmospheric and reservoir conditions; velocities with porosity in reservoir conditions. The correlations between velocities of the P-waves in atmospheric and reservoir conditions for the studied rocks manifested itself in linear function. Physical modeling of reservoir conditions allows adapting the values of elastic parameters obtained in atmospheric conditions to parameters of rocks in reservoir conditions.

The correlations between the electric and elastic properties and reservoir properties of siltstones and consolidated sandstones should be at the basis of preliminary interpretation of geophysical well logging on prospective areas of the southern slope of the Lviv Palaeozoic trough.

Keywords: resistivity, formation resistivity factor, velocity of elastic waves, correlations, siltstones, consolidated sandstones.

УДК 551.2.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.03>

M. Lubkov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher

e-mail: mikhail.lubkov@ukr.netPoltava Gravimetric Observatory of Institute of Geophysics
of Ukraine National Academy of Science
27/29 Mysoedova Str., Poltava, 36014, Ukraine**MODELING OF LANDSLIDE DEFORMATIONS UNDER THE ACTION OF GRAVITY***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.М. Іванік)*

Nowadays, there are actual problems associated with destructive slope processes under the influence of gravity load. Indeed, gravitational slope processes, together with other erosion and tectonic processes, contribute a lot to the formation of the modern relief and at the same time very often complicate the rational using of the corresponding territory. Landslide processes can be distinguished among the most dangerous gravitational slope processes. These processes are characterized by widespread distribution and significant material losses and human casualties to which they lead. Due to its social importance and practical engineering significance, the problems of studying gravitational shear processes have a long history. Therefore, many works are devoted to these problems, but from another hand, the cases of strict mathematical and mechanical description and determination of certain quantitative mechanisms and criteria for the development of sliding gravitational processes have been considered in a rather limited way. In presented work on the base of variational finite-element method, we calculate the rotational deformation and failure criteria of a wide class of three-dimensional heterogeneous anticlinal geostructures under the gravity load conditions. The simulation results show that the shear deformation of anticlinal geostructures under the influence of gravity depends on the shape, size of the structure, and mechanical properties of the rocks that make up these geostructures. We have established that more compact geostructures are subjected to the smallest deformation. In the solid geostructures that retain elastic properties, the deformations are inversely proportional to the degree of rock stiffness, and a decreasing in the curvature radius of the geostructure leads to an inversely proportional increase in the deformation of the corresponding geostructure. We have shown that in order to maintain resistance to shear soil gravity failure, anticlinal geostructures cannot be completely composed of rocks softer than semi-solid dispersed soils. It was established that the resistance to shear gravity soil failure of heterogeneous anticlinal geostructures is mainly determined by the rigidity of the internal bearing rocks, while the influence of the stiffness of the external soft rocks is relatively insignificant and has a non-linear character.

Keywords: computer modeling, landslide anticlines deformations, gravity load.

Introduction and statement of the problem. Nowadays, the problems associated with destructive slope processes under the influence of gravity load remain relevant. Indeed, gravitational slope processes, together with other erosion and tectonic events, play important role in the formation of the modern relief. These processes at the same time very often complicate the rational using of the corresponding territory. Landslide processes can be distinguished among the most dangerous gravitational slope events. These processes are characterized by widespread distribution and significant material losses and human casualties to which they lead. Landslide processes, among other gravitational slope processes, are characterized by the presence of a soil shifting without loss of continuous contact between the moving and stationary parts of the massif (Григоренко и др., 1992; Оцуню, 1999; Dikay et al., 1996; Bell and Maud, 2000; Pathak et al., 2008). Thus, for the description of gravitational shear soil processes, we can neglect the consideration of soil massif gaps with other rheological effects and limit ourselves to the application of the theory of elasticity for a solid medium. Gravitational soil shear processes are very numerous and have various geological forms (Bell and Maud, 2000; Hunter and Fell, 2003; Van Asch et al., 2007). Therefore, it's impossible to embrace all cases, so we limit ourselves to consideration of rotational gravitational soil shear processes for three-dimensional heterogeneous anticlinal geostructures. This case is common enough and can be very useful for practical applications.

Analysis of latest investigations. Due to its social importance and practical engineering significance, the problems of studying gravitational shear soil processes have a long history. Many works are devoted to these problems, among which the following can be singled out (Вэй, 2010; Кюль, 2017; Ниязов, 2015; Пендин и Фоменко, 2015; Фоменко, 2012; Hunter and Fell, 2003; Zhang et al., 2006; Van Asch et al., 2007; Pathak et al., 2008; Cruden and Lan, 2015). Due to the ambiguity and variety of natural and practical cases of gravity shear soil processes, these works mainly relate to the definition of general geological and

engineering classifications, qualitative criteria and mechanisms of destructive events. Computational models are simple enough and mostly limited by analytical and semi-analytical approximate methods.

Pinpointing unresolved issues. On the other hand, the cases of strict mathematical and mechanical description and determination of certain quantitative mechanisms and criteria for the development of sliding gravity processes, especially rheological numerical methods, have been considered in a rather limited way. The variational finite-element method proposed in this paper for solving the problem of the elasticity of multilayer orthotropic shells, taking into account the shear rigidity (Лубков, 2015) adequately allows calculating the deformation processes, mechanical behavior and failure criteria of a very common class of three-dimensional heterogeneous anticlinal geostructures in the conditions of gravity load. This approach has important theoretical and practical interest and provides a number of advantages compared to existing methods.

Setting objectives. The aim of the article is modeling of shear soil processes under gravity loads of wide class of heterogeneous anticlinal geostructures on the base of elaborated variational finite-element method.

Research part and findings validated. Mathematical formulation and solving problem. Consider the deformation of the anticlinal geostructure in the form of the upper half of a fragment of a three-layer cylindrical shell, which is rigidly fixed at the ends and is under the influence of gravity. To describe the deformation of the considered anticlinal geostructure, which consists of rocky or dispersed soil rocks (Трофимов, 2005; Zhang et al., 2006; Van Asch et al., 2007) we will use the theory of multilayer orthotropic elastic shells of rotation taking into account shear rigidity (Лубков, 2015). We will consider the shell in the curvilinear coordinate system (s, φ, z) , which we will consider rigidly fixed with a large solid rock massif. Here s, φ – coordinates along the surface of the shell; z is the shell thickness coordinate.

Displacements along the s, φ, z coordinates for the j -th layer of the shell can be represented in the form (Лубков, 2015):

$$\begin{aligned} u_j &= u_0(s, \varphi) + zu_1(s, \varphi); \\ v_j &= v_0(s, \varphi) + zv_1(s, \varphi); \\ w_j &= w_0(s, \varphi) + zw_1(s, \varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

here u_0, v_0, w_0 – displacement components of the middle surface of the shell; u_1, v_1 – rotation angles of the middle surface normal relatively coordinate lines $\varphi = \text{const}$, $s = \text{const}$ accordingly, w_1 – compression of the middle surface normal of the shell. Let's make the Lagrange functional (Лубков, 2015), which expresses the potential mechanical energy of the considered geostructure, which is under gravitational load conditions:

$$\begin{aligned} \tilde{W} &= \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 \int_{h_j} \int_S [E_{ss}^j \varepsilon_{ss}^j + E_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j + E_{zz}^j \varepsilon_{zz}^j + 2E_{s\varphi}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j + \\ &+ 2E_{sz}^j \varepsilon_{ss}^j \varepsilon_{zz}^j + 2E_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi\varphi}^j \varepsilon_{zz}^j + 4G_{s\varphi}^j \varepsilon_{s\varphi}^j + 4G_{sz}^j \varepsilon_{sz}^j + \\ &+ 4G_{\varphi z}^j \varepsilon_{\varphi z}^j - 2\rho_j g w_j] (1 + \frac{z}{R_g})^2 ds d\varphi dz - \\ &- \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} (T_{s0} u_0 + T_{s\varphi} v_0 + Q_s w_0) d\varphi - \int_{s_1}^{s_2} (T_{\varphi s} u_0 + T_{\varphi\varphi} v_0 + Q_{\varphi} w_0) ds. \end{aligned} \quad (2)$$

here R_g – the radius of curvature of the geostructure; g – gravity acceleration; S – surface area of the geostructure; h_j – thickness of the j -th layer of rocks of the geostructure; ρ_j – density of the j -th layer; $\varepsilon_{\alpha\beta}^j$ – components of the strain tensor of the j -th layer; $E_{\alpha\beta}^j$ – modulus of elasticity of the j -th layer; $G_{\alpha\beta}^j$ – components of the shear modulus of the j -th layer; $T_{\alpha}, T_{\alpha\beta}$ – forces acting on the contour of the geostructure in the tangential directions to its surface; Q_{α} – forces acting on the contour of the geostructure in directions perpendicular to its surface. The boundary conditions of the problem make up on the rigid fixation of the fragment of the considered geostructure at its ends.

For resolving the presented problem of deformation of the geostructure under the influence of gravity, we will use the finite element method based on the variational principle of Lagrange, which expresses the minimum potential mechanical energy of the system (Лубков, 2015):

$$\delta \tilde{W}(u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1) = 0. \quad (3)$$

For resolving the variational equation (3), we use the nine-node isoparametric quadrilateral shell finite element with a curved surface (Лубков, 2015). A curvilinear coordinate system (s, φ, z) is used as a global coordinate system, that is, a system where all finite elements (on which the research area is divided) are combined. As a local coordinate system, where every finite element form functions are constructed, normalized coordinate system (ξ, θ) is used. At the making of the finite element form functions, which approximate within each element the components of displacements $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$, for satisfaction of the conditions of smoothness and convergence of the finite-element solution, we use algebraic and trigonometric polynomials (Лубков, 2015):

$$\begin{aligned} u_0 &= \sum_{i=1}^9 N_i u_{0i}; \quad v_0 = \sum_{i=1}^9 N_i v_{0i}; \quad w_0 = \sum_{i=1}^9 N_i w_{0i}; \quad u_1 = \sum_{i=1}^9 N_i u_{1i}; \\ v_1 &= \sum_{i=1}^9 N_i v_{1i}; \quad w_1 = \sum_{i=1}^9 N_i w_{1i}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= H_1(\theta)P_1(\xi); \quad N_2 = H_1(\theta)P_2(\xi); \quad N_3 = H_3(\theta)P_2(\xi); \\ N_4 &= H_3(\theta)P_1(\xi); \quad N_5 = H_1(\theta)P_3(\xi); \quad N_6 = H_2(\theta)P_2(\xi); \\ N_7 &= H_3(\theta)P_3(\xi); \quad N_8 = H_2(\theta)P_1(\xi); \quad N_9 = H_2(\theta)P_3(\xi). \end{aligned} \quad (5)$$

$$H_1(\theta) = \frac{\sin(\theta - \theta_2) - \sin(\theta - \theta_3) + \sin(\theta_2 - \theta_3)}{\sin(\theta_1 - \theta_2) - \sin(\theta_1 - \theta_3) + \sin(\theta_2 - \theta_3)};$$

$$H_2(\theta) = \frac{\sin(\theta - \theta_3) - \sin(\theta - \theta_1) + \sin(\theta_3 - \theta_1)}{\sin(\theta_2 - \theta_3) - \sin(\theta_2 - \theta_1) + \sin(\theta_3 - \theta_1)};$$

$$H_3(\theta) = \frac{\sin(\theta - \theta_1) - \sin(\theta - \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_3 - \theta_1) - \sin(\theta_3 - \theta_2) + \sin(\theta_1 - \theta_2)};$$

$$H_j(\theta_k) = \begin{cases} 1, & j = k \\ 0, & j \neq k \end{cases};$$

$$P_1(\xi) = \frac{1}{2}\xi(\xi - 1); \quad P_2(\xi) = \frac{1}{2}\xi(\xi + 1); \quad P_3(\xi) = 1 - \xi^2. \quad (6)$$

The finite-element algorithm for solving the variational problem (3) is following. At the first stage, in the local coordinate system (ξ, θ) , we make approximation of all displacements and deformations from functional (2), which are functions of the displacement components $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$, with the help of formulas (4–6). Also, In the local system we carry out analytical integration within each shell layer, and then make summation over the entire package of the shell layers. At the second stage, the functional (2) is variated relatively all nodal displacement components and the corresponding variations are equalized to zero. As a result, for each finite element, we obtain a linear algebraic system consisting of 54 equations. At the third stage, in the global coordinate system (s, φ, z) , the summation of local linear systems of algebraic equations takes place over all the finite elements into which the shell is divided. Also, we make here the formation of the global system of linear equations. Calculation of double integrals over the area of the shell is carried out by numerical integration based on Gauss's quadrature formulas (Лубков, 2015). We resolve the global system of linear algebraic equations using the Gauss numerical method (Лубков, 2015). As a result, the displacement components $u_0, v_0, w_0, u_1, v_1, w_1$ can be determined at all nodal points of the finite element grid. Then components of displacements, deformations, stresses, and other interesting values can be determined from the found nodal displacement components at any point of the finite element, i.e., at any point of the considered shell geostructures.

Modeling of shear processes of anticlines under gravity loads. At modeling of the gravitational shear processes of anticlinal geostructures, we will consider the deformation of the upper half of a three-layer cylindrical shell under the action of gravity with the following parameters: the radius of the shell is 100 m, the thickness of the three layers of the shell is 10 m, respectively, the angle from the horizontal in the positive direction (counter-clockwise) is $\pi/2$. The average density of the considered rocks will be considered equaled to 2300 kg/m³. Firstly, we will consider the shear deformation (movement in the angular direction),

along the surface of the slope of homogeneous anticlinal geostructures. In fig. 1 we consider the case of rocky soil (Трофимов, 2005) with the following elastic properties: Young's modulus $E = 7 \cdot 10^{10}$ Pa, Poisson's ratio $\mu = 0.3$. Fig. 2 shows the case of solid dispersed soil rocks: $E = 7 \cdot 10^9$ Pa, $\mu = 0.3$. Fig. 3 shows the deformation of anticlinal geostructures, which also consist of solid dispersed rocks, when the radius of curvature of the structure is 80 m. Fig. 4 shows the deformation of

geostructures composed of semi-solid dispersed soil rocks ($E = 2 \cdot 10^9$ Pa, $\mu = 0.35$) and rigid plastic dispersed soil rocks ($E = 10^8$ Pa, $\mu = 0.4$) (Трофимов, 2005). In fig. 5 we consider the deformation of anticlinal geostructures, with the layers which consist of various combinations: 1) hard; 2) semi-hard; 3) tough-plastic; 4) plastic ($E = 5 \cdot 10^7$ Pa, $\mu = 0.4$); 5) soft-plastic ($E = 2 \cdot 10^7$ Pa, $\mu = 0.35$); 6) flow-plastic ($E = 2 \cdot 10^7$ Pa, $\mu = 0.45$) dispersed soil rocks (Трофимов, 2005).

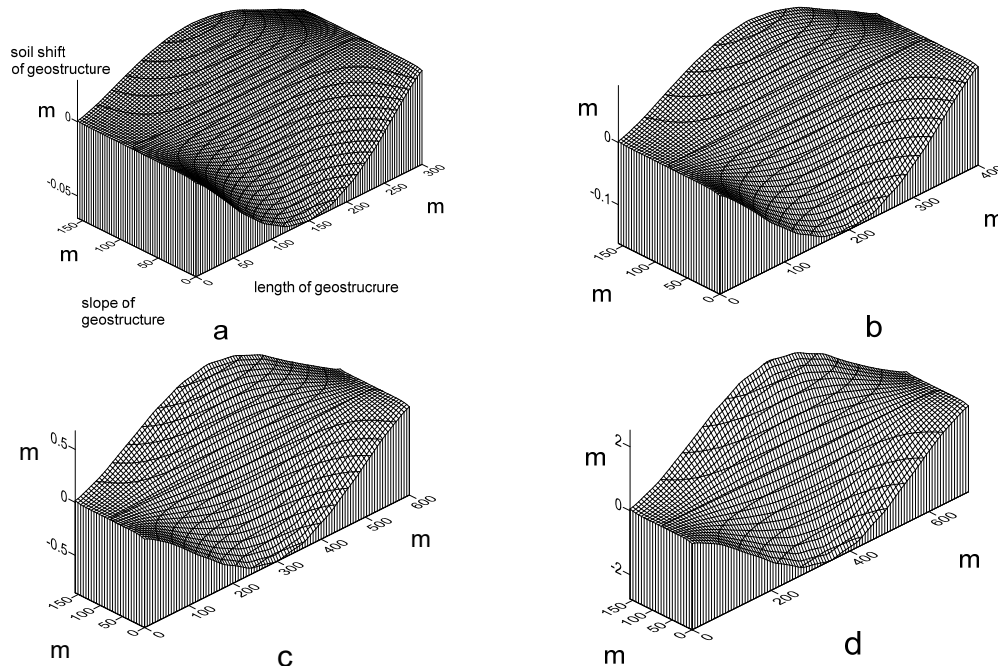


Fig. 1. Landslide deforming of anticline geostructures, which consist of rigid rocks, under gravity forces action: a – length of the geostructure 300 m; b – 400 m; c – 600 m; d – 700 m

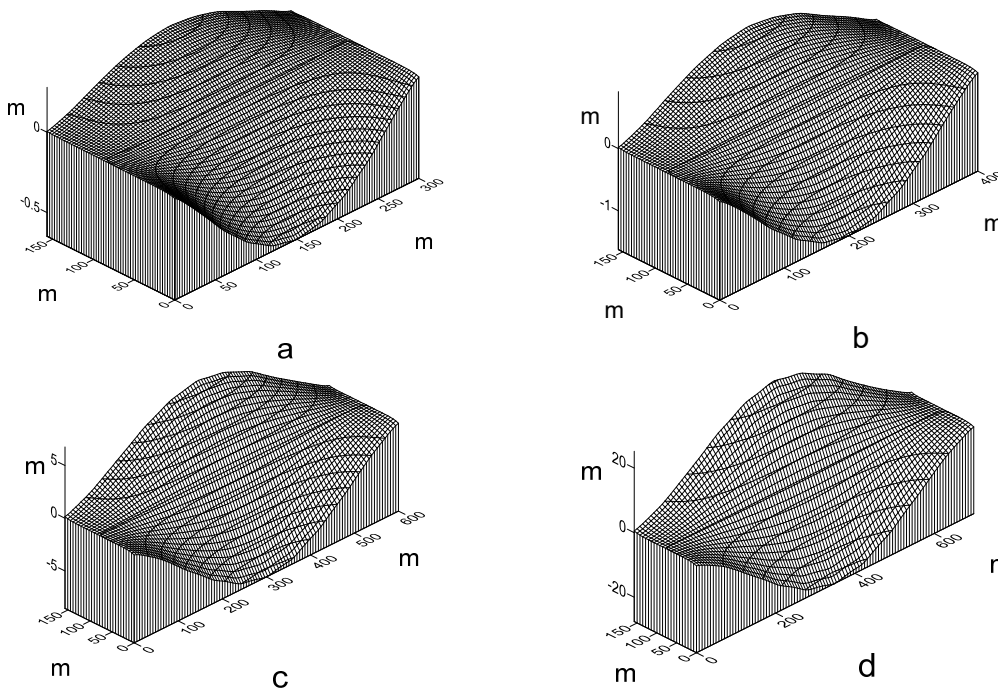


Fig. 2. Landslide deforming of anticline geostructures, which consist of rigid dispersing grounds, under gravity forces action: a – length of the geostructure 300 m; b – 400 m; c – 600 m; d – 700 m

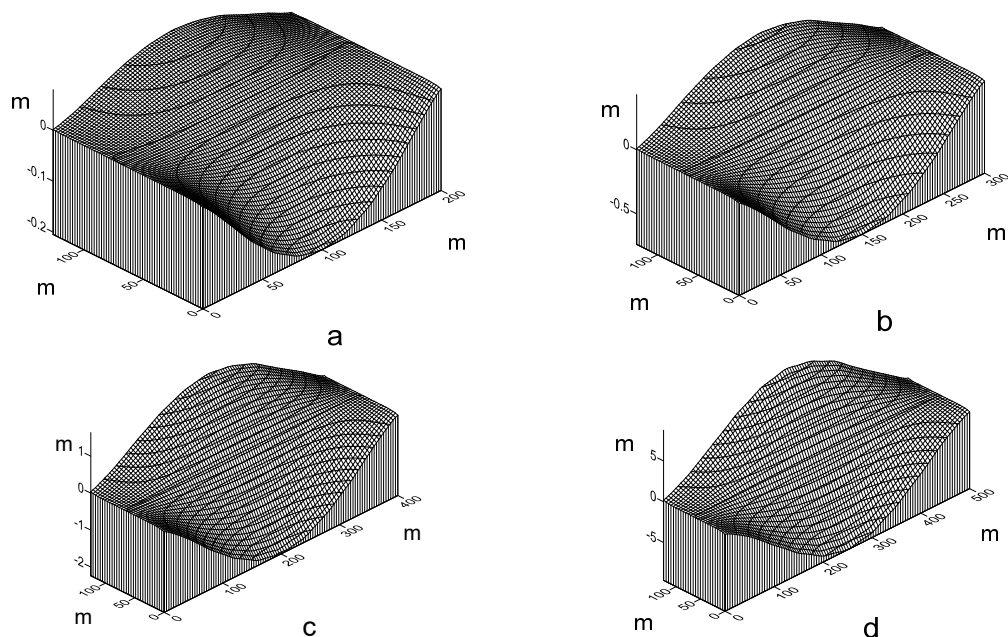


Fig. 3. Landslide deforming of anticline geostructures, which consist of rigid dispersing grounds, under gravity forces action (anticline curvature radius is 80 m):
a – length of the geostructure 200 m; b – 300 m; c – 400 m; d – 500 m

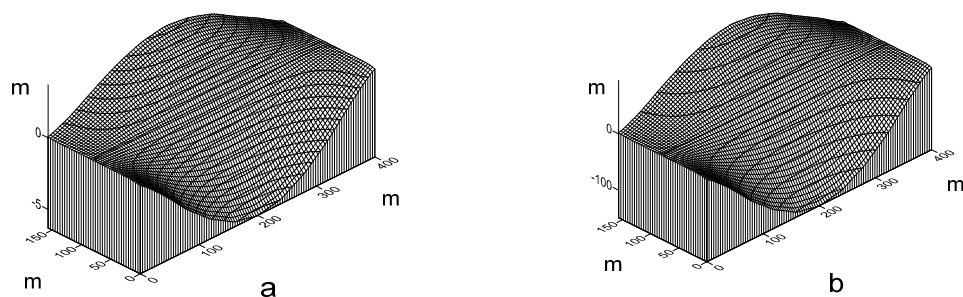


Fig. 4. Landslide deforming of anticline geostructures, which consist of soft dispersing grounds, under gravity forces action:
a – semi rigid grounds; b – tight plastic grounds

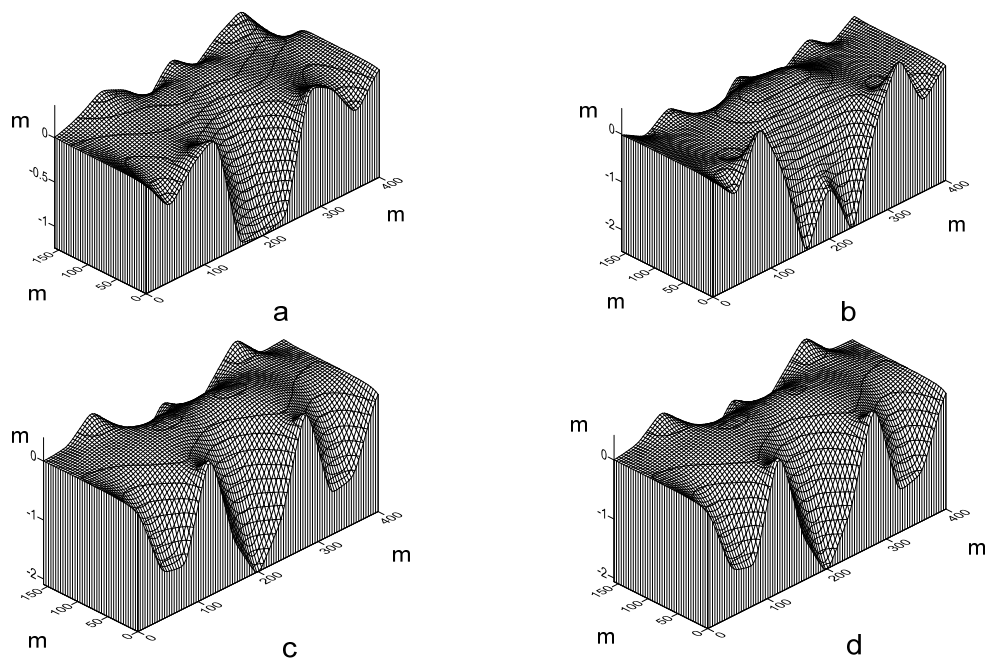


Fig. 5. Landslide deforming of three layers anticline geostructures with thickness of 10 m, which consist of combination of different dispersing grounds, under gravity forces action (calculation of layers begins from the bottom):
a – rigid, semi rigid, tight plastic; b – rigid, semi rigid, plastic; c – rigid, semi rigid, soft plastic; d – rigid, semi rigid, fluent plastic

Discussion of the results. The modeling results show that the shear deformation of anticlinal geostructures under the influence of gravity depends on the size of the structure, its shape and the mechanical properties of the rocks that make up these structures and, in some cases, requires careful research. In the fig. 1, we can reveal the degree of intensity of shear deformation of anticlinal geostructures of different linear sizes, consisting of the solid rocks. We can see that more compact structures are subject to the smallest deformation (Fig. 1a), for example, in a geostructure with a linear size of 300 m, the amplitude of the landslide does not exceed 7 cm, as the linear dimensions increase, the degree of deformation increases in a non-linear way. Thus, in the geostructure extending for 700 m (Fig. 1d), the amplitude of the landslide reaches 2.5 m. The largest shear deformations are observed in the lower middle part of the anticlinal geostructure, they have negative values (as the movement is clockwise), deformations in the positive direction can be observed in the upper part of the geostructure. This means that under the influence of gravity, the top of the geostructure can shift in the opposite angular direction. The fig. 2. presents the shear deformation of anticlinal geostructures, which consist of solid dispersed soil rocks (clays, sands, loams, sandy loams, etc.). These rocks have a rigidity approximately 10 times lower than a solid rock. As these rocks completely save their elastic properties, the inversely proportional character of the deformation relative to the rigidity of the rocks obviously will take place. So, we can see that in the fig. 2 magnitudes of deformations are approximately 10 times higher than the deformations of rock geostructures of corresponding sizes in the fig. 1. The fig. 3 presents the nature of shear deformation of anticlinal geostructures with a radius of curvature 20 percent smaller than the geostructures considered in the fig. 2. We can see that in this case, in comparison with the previous geostructures, which have the corresponding linear dimensions (Fig. 2a, b), shear deformations also increase by approximately 20 percent. Thus, in solid geostructures, where elastic properties are preserved, a decreasing of the radius of the geostructure leads to an inversely proportional increasing of the degree of deformation of the corresponding geostructure. In the fig. 4 there are presented shear deformation of anticlinal geostructures consisting of semi-hard and rigid-plastic dispersed soil rocks. We can see by comparing (Fig. 4a, b) that if elastic properties and corresponding deformations are still preserved for the semi-solid geostructures, but for the rigid-plastic geostructures there is a sharp jump in plastic creep, which leads to the complete destruction of the corresponding geostructure. Thus, we can conclude that in order to maintain resistance to gravitational destruction, anticlinal geostructures cannot consist entirely of rocks softer than semi-solid dispersed soils. Fig. 5 presents the nature of shear deformation of three-layer anticlinal geostructures, which consist of combinations of: solid, semi-solid, rigid, plastic, soft-plastic, and fluid-plastic dispersed soil rocks. Based on the previous results about the stability of anticlinal geostructures under the gravity load, we can suggest that only those structures can really exist where the lower and middle layers consist of solid and semi-solid dispersed soils, respectively. Comparing the cases (Fig. 4a-d), where the upper layers consist of rigid plastic, plastic, soft plastic and fluid plastic dispersed soils, we can see the nonlinear character of the shear deformation of these geostructures depending on the stiffness of the specified rocks. Indeed, at first, we can see an increasing of the amplitude of landslides in the case of the upper rigid plastic and plastic soils, but then in the upper

soft plastic and liquefiable soils we observe a slight but decreasing of the corresponding amplitudes of the landslides. Thus, the following conclusions can be made. Firstly, the gravitational shear deformation and resistance to the failure of multi-layered anticlinal geostructures is mainly determined by the rigidity of the internal bearing rocks, while the influence of the rigidity of the external rocks is relatively insignificant. Secondly, the stiffness of external soft soil rocks affects the shear deformation of multi-layered anticlinal geostructures in a non-linear way. This can be explained by the fact that in the defined intervals of nonlinearity, soft dispersed soils are more capable of strengthening and corresponding coupling under gravity load conditions.

Conclusions. The developed variational finite-element method for solving the elasticity problem for multi-layer orthotropic shells of rotation taking into account the shear rigidity allows to adequately investigate the shear rotational deformations and destructions criterions of heterogeneous three-dimensional anticlinal geostructures under the gravity load conditions at a quantitative level. The modeling results show that the shear deforming of anticlinal geostructures under the influence of gravity depends on the shape, dimensions of the structure, and mechanical properties of the soil rocks that make up these geostructures. It was established that more compact geostructures are subjected to the smallest shear deformation. In the solid geostructures that retain elastic properties, the shear deformation is inversely proportional to the degree of the rock stiffness, and a decreasing in the curvature radius of the geostructure leads to an inversely proportional increasing in the shear deforming of the corresponding geostructure. We have shown that in order to maintain resistance to gravitational shear failure, anticlinal geostructures cannot be completely composed of rocks softer than semi-solid dispersed soils. It was established that the resistance to gravitational destruction of heterogeneous anticlinal geostructures is mainly determined by the rigidity of the internal bearing rocks, while the influence of the stiffness of the external soft rocks is relatively insignificant and have a non-linear behavior. In the future, it is interesting to create a practically significant methodology for the prediction of natural and man-made gravitational shear solid failures based on the developed variational finite-element method.

References

- Bell, F., Maud, R.R. (2000). Landslide associated with the colluvial soils overlying the Natal group in the greater Durban region of Natal, South Africa. *Environmental geology*, 39 (9), 1029–1038.
- Dikau, R., Brunsder, P., Schrott, L., Ibsen, M.L. (1996). Landslide recognition. Wiley: Chichester, U.K.
- Fomenko, I.K. (2012). Modern tendencies in calculations of the slopes stability. *Engineering geology*, 6, 44–53. [in Russian]
- Grigorenko, A.G., Kyuntsel, V.V., Novak, V.E., Tamutis, Z.P. (1992). Engineering geodynamics: textbook for higher education. Kyiv: Lubid. [in Russian]
- Hunter, G., Fell, R. (2003). Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes. *Canadian geotechnical journal*, 40, 1123–1141.
- Lubkov, M.V. (2015). Forming process of the large scale geostructures in zone of continents collision. *Geoinformatics*, 54 (2), 38–45. [in Ukrainian]
- Niyazov, R.A. (2015). Landslides, called by Pamir-Gindukus earthquake. Taskent: GP "Institute GIDROENERGO". [in Russian]
- Osipov, V.I. (1999). Dangerous exogenous processes. Moscow: GEOS. [in Russian]
- Pathak, D.R., Gharti, H.N., Singh, A.B., Hiratsuka A. (2008). Stochastic modeling of progressive failure in heterogeneous soil slope. *Geotechnical and geological engineering*, 26, 113–120.
- Pendin, V.V., Fomenko, I.K. (2015). Metodology of evaluation and prognosis of landslide danger. Moscow: LENAND. [in Russian]
- Trofimov, V.T. (2005). Soil science. Moscow: NAUKA. [in Russian]
- Van Asch, T., Van Beek, L., Boggart, T. (2007). Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Engineering geology*, 91, 46–55.

Vay, Y.C. (2010). The main characteristics of the Vanchyang earthquake and its influence on the dangerous geological processes. *Georisk*, 1, 10–14. [in Russian]

Zhang, W.G., Chen, Y.M., Zhan, L.T. (2006). Loading/unloading response ratio theory applied in predicting deep-seated landslides triggering. *Engineering geology*, 82, 234–240.

Kyul, E.V. (2017). Tectonic landslide massifs of the Central Caucasus. *Geology and geophysics of the South Russia*, 2, 67–81. [in Russian]

Cruden, D., Lan Heng-Xing. (2015). Using the working classification of landslides to assess the danger from a natural slope. *Engineering geology for society and territory*, 2, 3–12.

Список використаних джерел

Вэй, Ю.Ц. (2010). Основные характеристики Вэнчуаньского землетрясения и его влияние на опасные геологические процессы. *Геориск*, 1, 10–14.

Григоренко, А.Г., Кюнтцель, В.В., Новак, В.Е., Тамутис, З.П. (1992) Инженерная геодинамика: учеб. пособие. К: Лыбидь.

Кюль, Е.В. (2017). Тектонические оползневые массивы Центрального Кавказа. *Геология и геофизика Юга России*, 2, 67–81.

Лубков, М.В. (2015). Процес формування великомасштабних геоструктур в зоні колізії континентів. *Геоінформатика*, 54 (2), 38–45.

Ниязов, Р.А. (2015). Оползни, вызванные Памиро-Гиндукушским землетрясением. Ташкент: ГП "Институт ГИДРОИНГЕО".

Осипов, В.И. (1999). Опасные экзогенные процессы. М.: ГЕОС.

Пендин, В.В., Фоменко, И.К. (2015). Методология оценки и прогноза оползневой опасности. М.: ЛЕНАНД.

Трофимов, В.Т. (2005). Грунтоведение. М.: Наука.

Фоменко, И.К. (2012). Современные тенденции в расчетах устойчивости склонов. *Инженерная геология*, 6, 44–53.

Bell, F., Maud, R.R. (2000). Landslide associated with the colluvial soils overlying the Natal group in the greater Durban region of Natal, South Africa. *Environmental geology*, 39 (9), 1029–1038.

Cruden, D., Lan Heng-Xing. (2015). Using the working classification of landslides to assess the danger from a natural slope. *Engineering geology for society and territory*, 2, 3–12.

Dikau, R., Brunsder, P., Schrott, L., Ibsen, M.L. (1996). Landslide recognition. Wiley: Chichester, U.K.

Hunter, G., Fell, R. (2003). Travel distance angle for "rapid" landslides in constructed and natural soil slopes. *Canadian geotechnical journal*, 40, 1123–1141.

Pathak, D.R., Gharti, H.N., Singh, A.B., Hiratsuka A. (2008). Stochastic modeling of progressive failure in heterogeneous soil slope. *Geotechnical and geological engineering*, 26, 113–120.

Van Asch, T., Van Beek, L., Boggart, T. (2007). Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides. *Engineering geology*, 91, 46–55.

Zhang, W.G., Chen, Y.M., Zhan, L.T. (2006). Loading/unloading response ratio theory applied in predicting deep-seated landslides triggering. *Engineering geology*, 82, 234–240.

Надійшла до редколегії 01.12.22

М. Лубков, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: mikhaillubkov@ukr.net

Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАНУ, вул. Мясоедова, 27/29, м. Полтава, 36014, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЗСУВНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПІД ДІЄЮ СИЛИ ТЯЖІННЯ

На сьогодні актуальними залишаються проблеми, пов'язані з деструктивними схиловими процесами під дією гравітаційного навантаження. Дійсно, гравітаційні схилі разом з іншими ерозійно-тектонічними процесами мають значний вплив на формування сучасного рельєфу і водночас дуже часто ускладнюють раціональне використання відповідної території. Серед найнебезпечніших гравітаційних схилових процесів можна виділити оповзеві (зсувні) процеси. Ці процеси характеризуються значним поширенням, матеріальними втратами та людськими жертвами. Проблеми вивчення процесів гравітаційного зсуву через свою соціальну важливість та практичну інженерну значущість мають давню історію. Відповідно цим проблемам присвячено багато робіт, але, з іншого боку, випадки строгого математичного й механічного опису та визначення певних кількісних механізмів і критеріїв щодо розвитку зсувних гравітаційних процесів розглядалися досить обмежено.

У представленій роботі на основі варіаційного методу скінченних елементів розраховано кількісні критерії обертового деформування та руйнування широкого класу тривимірних неоднорідних антиклінальних геоструктур в умовах гравітаційного навантаження. Результати моделювання показують, що зсувні деформації антиклінальних геоструктур під дією сили тяжіння залежать від форми, розмірів структури та механічних властивостей гірських порід, які утворюють ці геоструктури. Встановлено, що найменшим деформуванням піддаються більш компактні геоструктури. У твердих геоструктурах, що зберігають пружні властивості, амплітуди деформацій є обернено пропорційними ступеню жорсткості порід, а зменшення радіуса кривизни геоструктури призводить до обернено пропорційного збільшення деформування відповідної геоструктури. Ми показали, що для здатності збереження стійкості щодо руйнування під дією сили тяжіння, антиклінальні геоструктури не можуть повністю складатися з порід, м'якших за напівтверді дисперсні ґрунти. Встановлено, що стійкість до зсувно-гравітаційного руйнування неоднорідних антиклінальних геоструктур в основному визначається жорсткістю внутрішніх несучих порід, тоді як вплив жорсткості зовнішніх м'яких порід є відносно незначним і нелінійним.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, оповзеві деформації антикліналей, гравітаційне навантаження.

УДК 550.372/373+551.24.055

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.04>В. Ільєнко, канд. геол. наук
e-mail: ivageophysicist@gmail.comТ. Бурахович, д-р геол. наук,
e-mail: burahovich@ukr.netА. Кушнір, д-р геол. наук
e-mail: antonnn@ukr.netІнститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
просп. Академіка Палладіна 32, м. Київ, 03680, Україна

ІНТЕРПРЕТАЦІЯ 3D ГЕОЕЛЕКТРИЧНОЇ МОДЕЛІ РАЙОНУ ПЕРЕТИНУ ЗВІЗДАЛЬ-ЗАЛІСЬКОЇ ТА НЕМИРІВСЬКОЇ ЗОН РОЗЛОМІВ

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

Проведено геолого-геоелектричну інтерпретацію півдня глибинної тривимірної геоелектричної моделі центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита, побудованої із залученням даних експериментальних спостережень низькочастотного електромагнітного поля Землі, отриманих у 2019 р. Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України вздовж профілів Ординці-Побачів та Зозів-Стрижавка. Експериментальні матеріали опрацьовано за допомогою сучасного програмного комплексу PRC_MTMV, отримані оцінки типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3400 с, а також криві амплітудних значень позірної питомого електроімпедансу в діапазоні періодів від 10 до 10000 с та виконане 3D моделювання глибинного розподілу питомого електроімпедансу. За результатами виконаного моделювання і якісного аналізу параметрів магнітоваріаційного профілювання та кривих магнітотелуричного зондування й псевдорозрізів позірної опору виділено декілька локальних приповерхневих структур складної орієнтації у просторі, які приурочені до: Погребищенського та Огіївського розломів; окремих частин Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської зон розломів (ЗР) та їх сходження; областей кристалічного масиву Українського щита за межами зон розломів.

Основним результатом геолого-геоелектричної інтерпретації 3D моделі є виявлення нових аномалій низького опору у приповерхневій частині земної кори (від поверхні до 0,5–2 км), які відповідають структурним та металогеогенним особливостям території дослідження; підтвердження й деталізація аномально неоднорідного розподілу питомого опору у верхах верхньої мантії на глибинах від 70 до 120 км заходу Українського щита. Район перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської зон розломів характеризується як гальванічно зв'язаною різноорієнтованою у просторі системою аномалій електроімпедансу, так і локальними окремими приповерхневими аномаліями з низьким опором від 5 до 100 Ом·м, більшість яких простежується на глибину до 0,5–1 км.

Показано, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської і Немирівської зон розломів. Крім того, деякі аномалії знаходяться в граніт-мігматитах росинської структурно-формаційної зони поза межами тектоно-метасоматичних мінерогенічних зон. Аномалії переважно приурочені до зон дезинтеграції порід кристалічного фундаменту, видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітізованих порід. Частина поверхневих аномалій відповідає областям кори вивітрювання. Проведений геолого-геоелектричний аналіз моделі показав, що декілька ділянок потребують подальшого вивчення, а саме – субширотна аномалія на захід від профілю Зозів-Стрижавка та аномалія складної форми у східній частині району дослідження. Ділянку, перспективну за геоелектричними критеріями для пошуку корисних копалин, можна виділити в межах аномалії провідності, яка має глибинне продовження до 2 км і розташована в Брусилівській зоні розломів.

Ключові слова: геоелектромагнітні методи, інтерпретація тривимірної моделі, аномалії електропровідності, рудопошук корисних копалин.

Постановка проблеми. Поміж основних наукових напрямів та найважливіших проблем фундаментальних досліджень у галузі природничих наук приділено увагу вивченню глибинної будови літосфери методами геофізики з метою пошуку корисних копалин. Електромагнітні поля, індуковані в Землі низькочастотними джерелами природного зовнішнього походження, дають змогу отримати унікальну інформацію про глибинну геологічну будову Землі, а також перебіг фізико-хімічних процесів у її надрах. Більшість об'єктів пошуку в рудній та структурній геоелектриці зазвичай є складними тривимірними, тому сучасним засобом аналізу та інтерпретації даних має бути тривимірне моделювання. Аномалії електропровідності розглядаються як один із провідних факторів, що визначає можливі зони прояву геодинамічних процесів, а тому повинні бути досліджені з погляду можливого формування та розміщення родовищ корисних копалин.

У багатьох випадках геоелектромагнітні методи можуть виступати як засоби прямого пошуку масивів рудних об'єктів із підвищеною електропровідністю (Berdichevsky and Dmitriev, 2008; Smith, 2014). Просторове розташування рудопроявів переважно має стійкий зв'язок з певними тектонічними зонами (Khoza et al., 2013; Autio et al., 2020; Lilley et al., 2001; Бурахович и др., 2015; Bologna et al., 2014). Особливий інтерес становлять області перетину

двох глибинних зон розломів (ЗР), як зони підвищеної проникності для флюїдів, а отже як зони, перспективні на рудоутворення (Begg et al., 2010).

Аналіз публікацій за темою досліджень. За новими експериментальними магнітотелуричними (МТ) та магнітоваріаційними (МВ) даними, отриманими Інститутом НАН України у період з 2009 по 2019 р. (Анциферова, 2009; Бурахович та ін., 2015; Николаєв та ін., 2019; Ільєнко та ін., 2019, 2020), побудовано глибинну тривимірну модель розподілу питомого опору в земній корі та верхній мантії центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської ЗР Українського щита (УЩ) (Бурахович та ін., 2022). Установлено, що існують зв'язки між низькоомними аномаліями електропровідності та структурними й металогеогенними особливостями ЗР.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена висвітленню повного циклу МТ/МВ досліджень – від експериментальних спостережень, їх обробки і якісної інтерпретації до аналізу тривимірної глибинної моделі надр та її фізико-геологічного тлумачення для району перетину Звіздаль-Заліської і Немирівської ЗР. Слід відзначити досить складні геоелектричні умови досліджень, які пов'язані з природною обстановкою, а саме, малою товщиною осадових відкладів зі значеннями сумарної повздовжньої

провідності від 0,5 до 5 См та з окремими ділянками, де кристалічні породи виходять на денну поверхню. З одного боку, вивчення такого слабо диференційованого приповерхневого геоелектричного розрізу потребує підвищеної точності експериментальних вимірювань, з іншого, ускладнюють дослідження значні техногенні завади, що можуть бути викликані промисловими об'єктами, електрифікованими залізничними дорогами та іншими техногенними факторами. Загалом це потребує як застосування сучасної методики синхронного спостереження МТ/МВ полів з використанням двох довгоперіодних цифрових апаратурних комплексів серії LEMI-417, які є досить ефективними технічними засобами для глибинних електромагнітних зондувань земної кори і верхньої мантії, так і нових підходів до обробки й інтерпретації польових геоелектричних даних.

Мета – дослідження особливостей будови земної кори та верхньої мантії на основі тривимірної моделі розподілу електричного опору, побудованої за експериментальними даними магнітотелуричного зондування (МТЗ)

і магнітоваріаційного профілювання (МВП); пояснення природи аномалій високої електропровідності за геолого-геоелектричною інтерпретацією моделі у зв'язку з пошуком перспективних на корисні копалини структур у районі перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської ЗР.

Експериментальні спостереження. У 2019 р. було проведено синхронні спостереження електромагнітного поля Землі в широкому діапазоні періодів (T) уздовж двох профілів (рис. 1): Ординці-Лобачів (пр. 1 ORD – LBC) та Зозів-Стрижавка (пр. 2 ZZB – STR). Перший профіль із заходу на схід перетинає Подільський і Росинський, другий – Бузький і Росинський мегаблоки УЩ. Найзахідніший пункт ZZV розташований у Немирівській ЗР, яка в цьому місці є міжмегаблоковою (Gintov et al., 2018). Загалом виміри проведено у 12 пунктах, відстань між якими становить у середньому 10–15 км, спостереження в польових точках велися від 1 до 3 діб. У переважній більшості пунктів отримано кондиційні 5-компонентні записи електромагнітного поля, синхронні із записами на ще одній польовій точці.

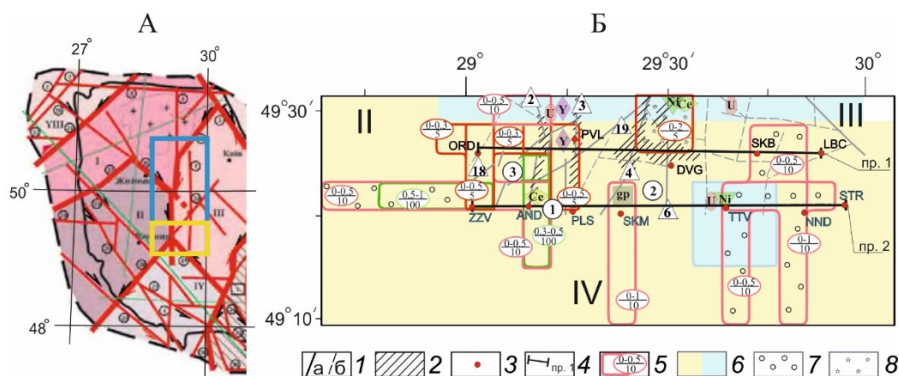


Рис. 1. Південна частина ((49°15' – 49°35' пн.ш.) × (28°45' – 30° зх.д.)) тривимірної моделі Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів (Бурахович та ін., 2022):

- А – фрагмент схеми мегаблоків УЩ за даними (Gintov et al., 2018), де синім прямокутником показана площа 3D геоелектричної моделі (Бурахович та ін., 2022), жовтим – південний фрагмент цієї моделі, який описується в цій статті;
- Б – геолого-тектонічна карта поверхні кристалічного фундаменту за даними (Державна..., 2005). Мегаблоки УЩ: I – Волинський, II – Подільський, III – Росинський, IV – Бузький; 1 – глибинні та головні розломи (а), інші тектонічні порушення (б); 2 – зони метасоматозу; 3 – пункти спостереження МТЗ та МВП; 4 – інтерпретаційні профілі: пр. 1 – Ординці-Лобачів, пр. 2 – Зозів-Стрижавка; 5 – параметри аномалій електропровідності в земній корі за результатами тривимірного моделювання електромагнітного поля: числівник – інтервал глибин (км), знаменник – ρ згідно з моделлю (Ом·м); 6 – аномально неоднорідна верхня мантія на глибинах від 70 до 120 км з ρ : жовтий колір – 50 Ом·м, синій – 250 Ом·м; 7 – ділянки, що потребують подальшого вивчення; 8 – перспективна для пошуку корисних копалин; зони розломів, позначені цифрами в кружках: 1 – Звіздаль-Заліська, 2 – Брусилівська, 3 – Немирівська; розломи, позначені цифрами в трикутниках (нумерація відповідає рис. 1 статті (Бурахович та ін., 2022)): 2 – Огіївський, 3 – Погребищенський, 4 – Кочерівський, 6 – Великоерчиківський, 18 – Таборівський, 19 – Павлівський; корисні копалини показано буквами: нікель (Ni), церій (Ce), ітрій (Y), уран (U), графіт (gr)

Обробку експериментальних даних проведено за допомогою програмного комплексу PRC-MTMV, що забезпечує спільне захищене від завад оцінювання імпедансу й комплексних індукційних параметрів за синхронними МТ/МВ-записами. Було отримано оцінки типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3400 с (рис. 2) та кривих позірного опору (ρ_n) і фаз імпедансу (φ) для періодів від 10–20 до 10000 с (рис. 3).

МВП. Згідно із співвідношеннями Візе просторова орієнтація типперів така, що дійсний типпер (VEC_{Re}) у широкому інтервалі достатньо низьких частот направлений від зони високої електропровідності до зони низької електропровідності. Одночасно на двох профілях спостерігається така орієнтація VEC_{Re} : в інтервалі періодів $T < 400$ с у пунктах ORD, PVL, ZZV, AND, PLS та SKM –

південь (іноді південний схід), у решті пунктів – південний-захід, захід; в інтервалі періодів $T > 400$ с у першій групі пунктів спостережень – південний-захід, захід, у другій групі – захід. Максимальні значення VEC_{Re} досягають значень 0,3 – 0,4 (іноді 0,5) і спостерігаються в періодах біля 250 с. Із збільшенням T вони знижуються до рівня, меншого за 0,1. Значення уявного типперу (VEC_{Im}) лежать у межах 0,1 – 0,5 і здебільшого є меншими за VEC_{Re} , кут між дійсним та уявним типперами варіює від 90° до 180°. У поодиноких випадках незалежно від T спостерігаються значно більші за 0,5–1 значення VEC_{Re} або VEC_{Im} . Такі дані вважалися похибками (похибка встановлена під час обробки у програмному комплексі PRC-MTMV) і в подальшому не використовувались при інтерпретації.

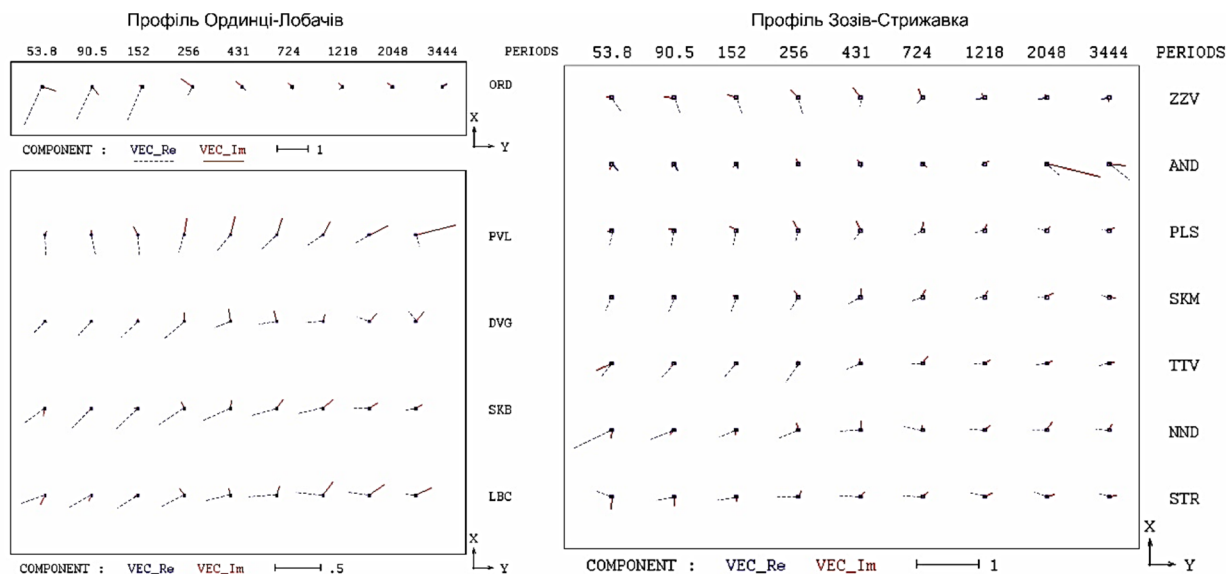


Рис. 2. Спостережені типпери МВП уздовж профілів Ординці-Лобачів та Зозів-Стрижавка, отримані з використанням програми PRC-MTMV:

VEC_Re – дійсні (синій колір) та VEC_Im – уявні (червоний колір)

МТЗ. Амплітудні і фазові криві МТЗ, отримані в пунктах району досліджень, зображено на рис. 3. Незважаючи на сучасні підходи обробки, деякі криві МТЗ в широкому діапазоні періодів ($T > (3-5) \cdot 10^3$ с) отримано зі значним розкидом за позірним опором ρ_n (подекуди декілька порядків). Відомо, що при $T > 10^3$ с спостерігається значна дисперсія значень ρ_n і фази φ_z . Мала амплітуда варіацій природного електромагнітного поля в цьому діапазоні періодів зумовлює нестійкість визначення імпедансу, що відповідно спричинює низьку точність оцінок позірного опору і фази. В окремих пунктах (ORD і DVG, NND і STR) суттєвий розкид значень ρ_n і φ_z наявний майже в усьому частотному діапазоні (останні два пункти спостережень розташовані за межами ЗР у кристалічних масивах), що пов'язано із значним впливом техногенних завад на точність визначення імпедансу.

Виділяється кілька особливостей поведінки в більшості кривих МТЗ. Насамперед помітні істотні гальванічні впливи на рівень імпедансу в усьому вимірюваному діапазоні T геомагнітних варіацій (він переважно вищий за характерний для глобальних даних), які викликані поверхневими провідними локальними тривимірними неоднорідностями. Крім того, в інтервалі періодів $T > 2 \cdot 10^2$ с спостерігаються розбіжності ρ_n біля одного порядку залежно від просторової орієнтації вимірювальних ліній, при цьому співвідношення між ρ_{xy} та ρ_{yx} залишається однаковим майже в усьому частотному діапазоні (за винятком пункту SKB, TTV). Загальний рівень ρ_n багатьох амплітудних кривих МТЗ лежить у межах від 10^2 до 10^3 Ом·м. Характерною особливістю кривих позірного опору є наявність на них декількох незначних мінімумів ρ_n в діапазоні T від 10^2 до 10^3 с.

Фазові криві φ_z не завжди відповідають амплітудним, а самі значення фаз змінюються в широкому інтервалі. Так, для $T < 1000$ с фази лежать у межах від -40° до -70° , зі збільшенням періоду коливань вони переважно мають більші (за модулем) значення – від -50° до -80° і лише в пунктах AND і SKM прямують до -90° , що може вказувати на наявність глибинного провідника. Як зазначалось вище, у пунктах ORD і DVG, NND і STR якість записів низька, отже параметри обробки, отримані на цих пунктах спостережень, важко піддаються інтерпретації.

Хоча обробка записаних варіацій МТ поля з використанням програмного комплексу PRC_MTMV дозволяє отримувати діаграми передавальних операторів поля, візуалізація результатів обробки здійснювалася лише в системі координат північ-південь – схід-захід. Це пов'язано з тим, що зміни геоелектричних параметрів краще проявляються в перпендикулярному до простягання геологічних структур напрямку, а в межах ділянки досліджень тектонічні структури переважно витягнуті в субмеридіональному (уздовж осі x) напрямку.

Відомо, що набори псевдорозрізів – карт ізоліній найбільш інформативних компонент функцій відгуку, побудованих у вертикальній площині профілю спостережень з глибинним продовженням періоду коливань T , дають можливість наочного відображення отриманих результатів, особливо в разі виділення на профілях досліджень локальних зон високої електропровідності. У зв'язку із цим уздовж обох профілів були побудовані псевдорозрізи спостережених позірних опорів для різних поляризацій поля ρ_{xysp} і ρ_{yxsp} , а також фази ефективного імпедансу $\varphi(\text{еф})$ (рис. 4а, б).

Профіль Ординці-Лобачів (пр. 1). На псевдорозрізах позірного опору (рис. 4а) між пікетами 0–25 км у пунктах ORD і PVL проявляються знижені значення ρ_n від перших десятків до 200 Ом·м (для поляризації ρ_{xy}) та 200–500 Ом·м (для поляризації ρ_{yx}). Пункт PVL просторово розташований у межах Погребищенського глибинного розлому, а саме – у зоні перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської ЗР. Встановлені "відносно" низькі значення ρ_{yx} від 100 до 500 Ом·м у межах пікетів 50–65 км (навколо пункту SKB). Значення $\varphi(\text{еф})$ загалом уздовж профілю не є аномальними. Єдиний виняток становить інтервал профілю поміж пікетами 50 і 55 км, який характеризується підвищеними значеннями фази, зокрема у пункті SKB $\varphi(\text{еф})$ більша за -75° .

Профіль Зозів-Стрижавка (пр. 2). Псевдорозрізи ρ_n уздовж профілю Зозів-Стрижавка (рис. 4а) характеризуються постійною зміною співвідношення позірних опорів ρ_{xy} та ρ_{yx} . Їх знижені значення від перших одиниць до менших за 500 Ом·м (для поляризації ρ_{xy}) та менші за 1000 Ом·м (для поляризації ρ_{yx}) проявилися вздовж профілю на пікетах від 10 до 33 км (в пунктах AND, PLS,

SKM) у зоні зближення Звіздаль-Заліської з Брусилівською ЗР, південніше перетину з Немирівською ЗР. У межах останньої розташований пункт ZZV (пікет 0 км), у якому на довгих та коротких періодах отримані низькі значення ρ_{yx} (від перших десятків до < 500 Ом·м). Амплітудні криві MT3 різної поляризації в пункті TTV (пікет 45 км) розходяться за рівнем і в значному діапазоні періодів відповідають значенням $\rho_{xy} \approx 1000$ Ом·м, $\rho_{yx} \approx 200$ Ом·м. Навколо пункту NND (біля пікету 60 км) проявилася локальна аномальна зона, у якій на коротких періодах рівень значень ρ_n лежить у межах від 75 до 500 Ом·м. На псевдорозрізі $\Phi(\text{еф})$ у діапазоні періодів $T > 4000$ с спостерігається висока електропровідність навколо пункту AND, приуроченого до Огіївського глибинного розлому, що добре узгоджується з низькими значеннями позірного опору у околі цього ж пункту на псевдорозрізі ρ_{xy} .

Виходячи з короткого опису параметрів МБП, кривих MT3 та їх псевдорозрізів, можна виділити декілька локальних приповерхневих структур складної орієнтації у просторі (рис. 16). Зокрема, уздовж профілю 1 Ординці-Лобачів такі структури проявилися в околі пунктів ORD, PVL і SKB, водночас в околі пункту PVL структура приурочена до Погребищенського розлому. Уздовж профілю 2 Зозів-Стрижавка зафіксовано декілька зон підвищеної провідності: в інтервалі пікетів 0–33 км (зона сходження Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської ЗР) з максимальною провідністю в пункті AND, приуроченого до Огіївського глибинного розлому; в околі пункту SKM – окрема аномалія, приурочена до Брусилівської ЗР; в околі пункту NND – аномалія за межами ЗР у кристалічному масиві.

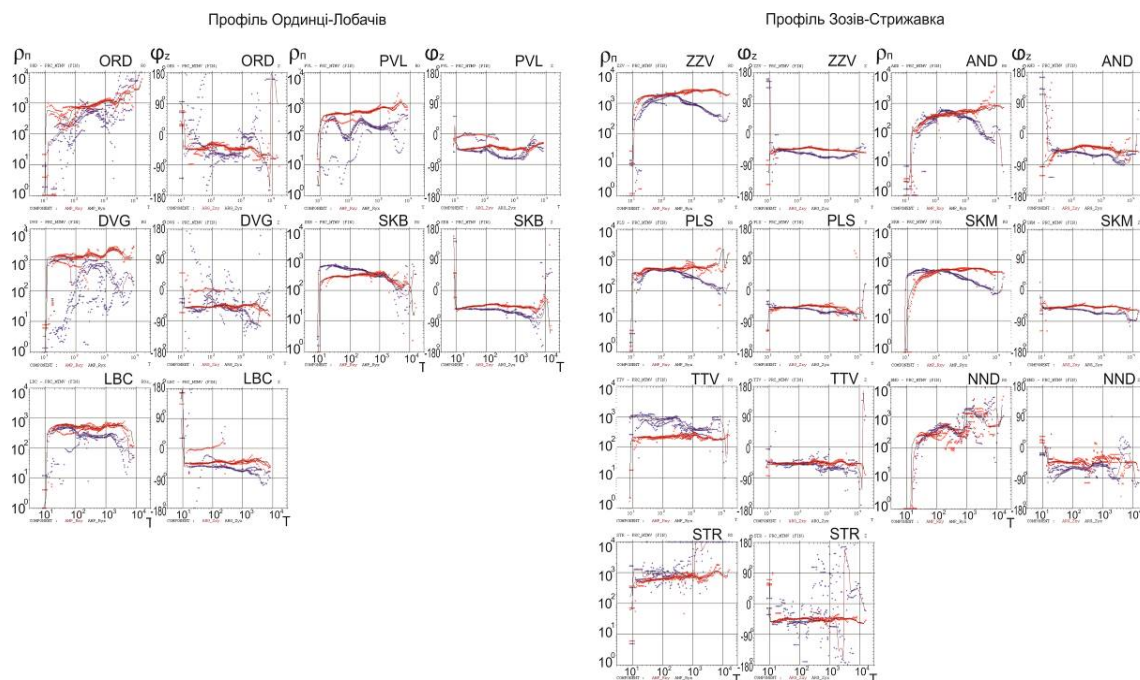


Рис. 3. Амплітудні (ρ_n) і фазові (ϕ_z) криві MT3 уздовж профілів Ординці-Лобачів та Зозів-Стрижавка:

Вертикальна шкала – ρ_n (Ом·м) і ϕ_z (градус), горизонтальна – T (секунди);

криві ρ_{xy} (поляризація північ-південь) позначено синім кольором, криві ρ_{yx} (поляризація схід-захід) позначено червоним кольором

Аналіз та геолого-мінералогічна інтерпретація тривимірної геоелектричної моделі. З метою з'ясування глибинної будови складної в геоелектричному сенсі зони зчленування трьох мегаблоків західної частини Українського щита (Волинського, Подільського та Росинського) створено тривимірну геоелектричну модель центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів (рис. 1А) у межах планшета (49°15'–50°40' пн.ш.)×(28°45'–30° зх.д.) (Бурахович та ін., 2022). Проаналізуємо південну частину побудованої моделі в контурах (49°15'–49°35' пн.ш.)×(28°45'–30° зх.д.).

На рис. 4 показано зіставлення спостережених псевдорозрізів ρ_n вздовж профілів 1 і 2 (рис. 4а, б), побудованих за результатами обробки експериментальних даних, з аналогічними псевдорозрізами (рис. 4г) геоелектричної тривимірної моделі, яка представлена розрізами питомого опору (ρ) вздовж профілів (рис. 4в). Більшість із багатьох приповерхневих аномалій з низьким ρ від 5 до 100 Ом·м простежується на глибину до 0,5–1 км, і тільки одна аномалія простежується на глибину до 2 км. Згідно з геоелектричною моделлю виділені об'єкти переважно є складовою частиною аномалій уздовж протяжних ЗР і

доповнюють поперемінні в просторі зони високого і низького опору різної орієнтації. Спостерігаються зв'язки між областями аномально високої електропровідності, проявленими на фоні нормального розрізу в земній корі ($\rho=1000$ Ом·м), і структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської ЗР.

Профіль 1. У межах планшета загальна протяжність профілю становить близько 65 км. На заході профіль проходить у Подільському мегаблоці (пікети 0–15 км), у подальшому на схід до кінця профілю – у Росинському (рис. 1). Східна частина першої вздовж профілю приповерхневої аномалії (пікети 0–20 км) приурочена до перетину Немирівської та Звіздаль-Заліської ЗР (пікети 6–20 км). Ця зона високої провідності починається на відстані близько 7 км від початку профілю, має субширотне простягання, характеризується низькими значеннями питомого опору ($\rho=5$ Ом·м) та глибиною залягання 300–500 м (рис. 4в). Місця максимального занурення аномальної області відповідають перетинам з провідниками субмеридіональної орієнтації, приуроченими до зон перетину Таборівського й Павлівського з Огіївським і Погребищенським розломами.

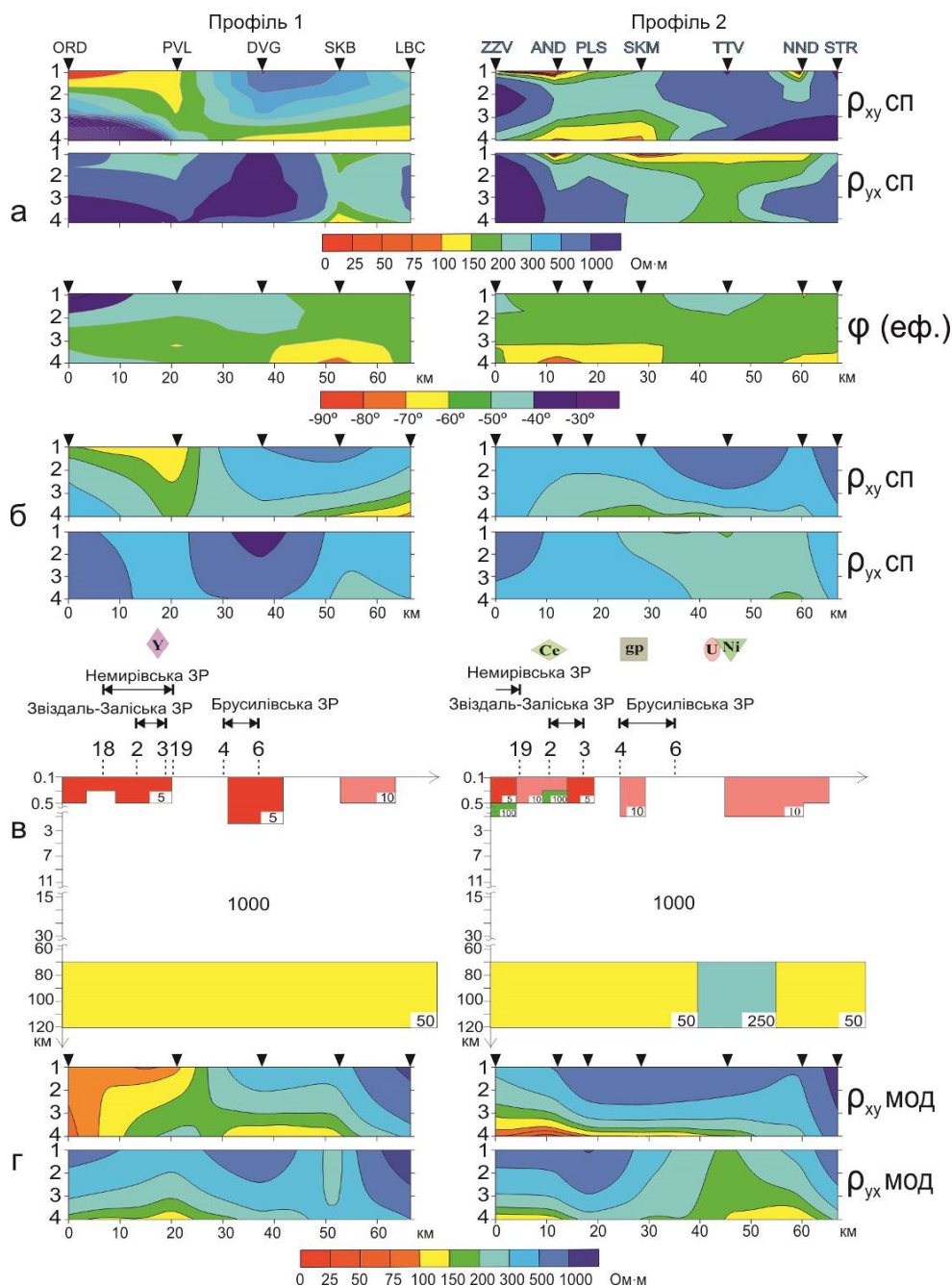


Рис. 4. Геолого-геоелектрична інтерпретація тривимірної моделі вздовж пр. 1 та пр. 2:

- а – псевдорозрізи розподілу спостережених ρ_n (поляризація: північ-південь – ρ_{xy} , схід-захід – ρ_{yx}) і $\phi_{(еф)}$ (вертикальна шкала в логарифмічному масштабі) для T від 10 до 10000 с; б – псевдорозрізи розподілу спостережених ρ_n (вертикальна шкала – періоди $T=10, 100, 1000, 10000$ с у логарифмічному масштабі); в – розрізи розподілу питомого опору ρ тривимірної моделі; г – псевдорозрізи ρ_n , побудовані за результатами моделювання (вертикальна шкала – періоди $T=10, 100, 1000, 10000$ с у логарифмічному масштабі).
Ум. позн. рудопроявів і номери розломів див. на рис. 1

У межах аномалії електропровідності розташоване Погребищенське рудне поле (49° 27' пн. ш. і 29° 15' сх.д.), де присутні рудопрояви ітрію (Державна..., 2005). Рудопрояви присутні в корі вивітрювання гранітів уманського комплексу та графітізованих амфіболітах росинсько-тікецької серії. Також тут є прояви урану, пов'язані з пегматитами уманського комплексу, які приурочені до перетину Немирівської ЗР і Погребищенського розлому.

Наступна приповерхнева аномалія, яку профіль перетинає в її південній частині (пікети 30–40 км), локалізована в межах Брусилівської ЗР, характеризується однорідним низьким питомим опором ($\rho=5$ Ом·м) і простежується до

глибини 2 км. У середині аномалії розташовані Кочерівський та Великоєрчиківський розломи, яким притаманний природномий метасоматоз, який зазвичай пов'язаний із зонами металогенічних рудних полів. У даному випадку аномалія є частиною Брусилівської уран-благороднометальної мінерагенічної зони (Державна..., 2005). Рудопрояви нікелю виявлені біля с. Каленна (49° 30' пн. ш. і 29° 30' сх.д.), де оконтурені три масиви з кораами вивітрювання серпентинітів (Анциферова, 2009).

Остання вздовж профілю приповерхнева аномалія лежить в інтервалі пікетів 53–63 км. Вона характеризується зниженим питомим опором ($\rho=10$ Ом·м) і продовжується

на глибину до 500 м (рис. 4в). Північна складна за формою частина цієї аномальної області приурочена до зони перетину різнонаправлених локальних розломів. На сьогодні відсутня будь-яка апіорна інформація про зв'язок даної аномалії з рудопроявами, але важливою є та обставина, що аномалія зосереджена в межах Білоцерківського каолініт-уран-рідкоземельного району (Державна..., 2005). У подальшому цей район потребує додаткових геофізичних досліджень.

Профіль 2 також, як і профіль 1, має протяжність близько 65 км, перетинаючи Бузький (пікети 0–20 км) та Росинський мегаблоки (рис. 1). Перші 20 км профілю (Бузький мегаблок) проходять через східну частину видовженої субширотної приповерхневої аномалії електропровідності загальними розмірами 45×5 км, у межах якої питомий опір змінюється від 5 до 100 Ом·м (рис. 4в). Глибинне продовження аномалії в її середній частині (західне закінчення профілю) збільшується до 1 км, а на крайових закінченнях зменшується до 500 м. Найнижчі значення ρ аномалії зосереджені на глибинах до 500 м. Павлівський та Погребищенський (меншою мірою Огіївський) розломи проявилися найбільш провідними частинами розгалуженої гальванічно пов'язаної системи субмеридіональних аномалій. У межах зони метасоматозу Огіївського розлому ділянка відповідає Брусилівській уран-благороднометалічній мінералізаційній зоні з наявними в ній рудопроявами церію (Державна..., 2005). Західна частина аномалії, яка знаходиться за межами профілю, потребує додаткових експериментальних спостережень з метою підтвердження й уточнення геоелектричної будови, отриманої за результатами тривимірного моделювання.

Кочерівський розлом як складова частина Брусилівської ЗР (пікети 25–30 км) проявився у вигляді провідної структури з питомим опором $\rho = 10$ Ом·м, яка простежується від поверхні на глибину до 1 км (рис. 4в). Здебільшого зони тектонічних порушень характеризуються низькими ρ порівняно із вмісними породами, завдяки метасоматичним змінам навколорудних порід, зокрема графітизації та ін. За геологічними даними (Яценко, 2008), стверджується існування на різних глибинах формацій із вмістом у них графіту, що дає підстави для припущення наявності зв'язку виявленої аномальної електропровідності із присутністю рудопоявів графіту (Державна..., 2005).

Ще одна приповерхнева аномалія електропровідності спостерігається вздовж профілю в інтервалі пікетів 45–63 км. Аномалія простежується від поверхні до глибини 1 км і має питомий опір $\rho = 10$ Ом·м (рис. 4в). Вона є субширотною складовою загальної аномалії складної конфігурації з кількома гілками різної орієнтації. Вся виявлена структура просторово не відповідає будь-якій тектонічній одиниці високого порядку, водночас в її межах присутні рудопояви нікелю та урану, також вона частково приурочена до Тетіївського уранорудного поля, не пов'язаного з тектоно-метасоматичними зонами (Державна..., 2005).

У "нормальному" глибинному геоелектричному розрізі УЩ середовище, що вміщує приповерхневі аномалії, має питомий опір $\rho \approx 1000$ Ом·м в інтервалі глибин до 160 км. Відмінність глибинної геоелектричної будови західної частини УЩ полягає в аномально неоднорідному розподілі питомого опору ($\rho = 50, 250$ Ом·м) у верхній частині верхньої мантії в інтервалі глибин від 70 до 120 км (рис. 1, 4в), який було підтверджено й уточнено тривимірним моделюванням (Бурахович та ін., 2022). Отримані результати глибинних електромагнітних досліджень підтверджують особливість глибинної будови цього регіону

УЩ, раніше встановлену глибинними сейсмічними дослідженнями вздовж VI геотраверсу. Результатами цих глибинних сейсмічних зондувань встановлено, що Бузький мегаблок має структуру куполоподібного підняття, що простежується по межі Мохо, у верхній мантії та в самій середній земній корі (Ільченко і др., 1988).

Висновки. Дані експериментальних геоелектромагнітних спостережень, проведених Інститутом геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України у 2019 р., було опрацьовано за допомогою сучасного програмного комплексу PRC_MTMV, що забезпечує спільне завадозахищене оцінювання імпедансу за синхронними магнітотелуричними записами. Надійно отримані оцінки типперів для періодів геомагнітних варіацій від 50 до 3400 с та криві позірною питомого електричного опору (амплітудні криві) і фаз імпедансу для періодів від 10 до 10000 с були використані при побудові глибинної тривимірної моделі розподілу питомого опору в земній корі та верхній мантії. Геолого-геоелектрична інтерпретація отриманої моделі дозволила виявити:

- нові аномалії високої електропровідності у приповерхневій частині земної кори, які відповідають структурним та металогенічним особливостям території дослідження;
- підтвердити та деталізувати аномально неоднорідний розподіл питомого опору у верхах верхньої мантії.

Район перетину Звіздаль-Заліської та Немирівської зон розломів характеризується як гальванічно зв'язаною різноорієнтованою в просторі системою провідних зон, так і локальними окремими приповерхневими аномаліями з низьким питомим опором від 5 до 100 Ом·м, більшість яких простежується до глибин 0.5–1 км.

Показано, що існують зв'язки між електропровідністю та структурними особливостями Звіздаль-Заліської, Брусилівської та Немирівської зон розломів. Крім того, деякі аномалії виявляються в граніт-мігматитах росинської структурно-формаційної зони поза межами тектоно-метасоматичних мінералізаційних зон. Аномалії електропровідності приурочені переважно до зон дезінтеграції порід кристалічного фундаменту, видовжених зон метасоматозу і районів поширення графітизованих порід, водночас частина поверхневих аномалій відповідає областям кір вивітрювання.

Проведений геолого-геоелектричний аналіз моделі показав, що декілька ділянок потребують подальшого вивчення, а саме – субширотно аномалія на захід від профілю Зозів-Стрижавка та аномалія складної форми у східній частині району робіт.

Аномалію, яка виділяється в межах Брусилівської зони розломів і простежується до глибини 2 км, за геоелектричними критеріями можна вважати перспективною для пошуку корисних копалин.

Список використаних джерел

- Анциферова, А.В. (Ред.). (2009). Геолого-геофізическая модель Немировско-Кочеровской шовной зоны Украинского щита. Донецк: Вебер.
- Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю., Шеремет, Е.М., Ширков, Б.И. (2015). Геоэлектрические аномалии Украинского щита и их связь с рудопроявлениями полезных ископаемых. *Геофизический журнал*, (6), 42–63.
- Бурахович, Т.К., Ільченко, В.А., Кушнір, А.М. (2022). Тривимірна геоелектрична модель центральної частини Звіздаль-Заліської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофизический журнал*, 44 (4).
- Державна геологічна карта України масштабу 1:200000 аркуша М-35-XXIV (Сквира). (2005). Київ: Геоінформ України.
- Гітов, О.Б., Орлюк, М.І., Ентін, В.А., Пашкевич, І., Мичак, С.В., Бакаржієва, М.І., Шимків, Л.М., Марченко, А.В. (2018). Структура західної і центральної частин Українського щита. Спірні питання. *Геофизический журнал*, 40 (6), 3–29. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000>
- Ільченко, Т.В., Сологуб, Н.В., Трипольский, А.А., Чекунов, А.В. (1988). Литосфера Центральной и Восточной Европы: Географеры IV, VI, VIII. Киев: Наук. думка.

Ільєнко, В.А., Кушнір, А.М., Бурахович, Т.К. (2019). Електромагнітні дослідження Звіздаль-Запільської та Брусилівської зон розломів Українського щита. *Геофізичний журнал*, 41 (4), 97–113. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177370

Ільєнко, В., Бурахович, Т., Кушнір, А., Попов, С., Омельчук, О. (2020). МТ/МВ дослідження в зоні ендоконтакту Корнінського гранітного масиву. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 88 (1), 46–52. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07

Николаев, І.Ю., Кушнір, А.М., Ільєнко, В.А., Николаев, Ю.І. (2019). Електромагнітні дослідження західної частини Українського щита. *Геофізичний журнал*, 41 (3), 120–133. doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433

Яценко, В. Г. (2008). Геология, минералогия и генезис графита украинского щита. Киев: Логос.

Autio, U.A., Smirnov, M.Y., Smirnova, M., Bauer, T.E. (2020). Magnetotelluric array in the central Finnish Lapland II: 3-D inversion and tectonic implications. *Tectonophysics*, 794:228574. DOI:10.1016/j.tecto.2020.228574

Begg, G., Hronsky, J., Arndt, N. et al. (2010). Lithospheric, cratonic and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. *Economic Geology*, 105, 1057–1070.

Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Berlin Springer-Verlag Heidelberg.

Bologna, M., Padilha, A.L., Pádua, M.B., Vitorello, I., Chamalaun, F.H. (2014). Paraguay-Araguaia Belt Conductivity Anomaly: A fundamental tectonic boundary in South American Platform imaged by electromagnetic induction surveys. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15 (3), 509–515. DOI:10.1002/2013GC004970

Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensoopust, M.P., Webb, S.J. (2013). Lithospheric structure of an Archean craton and adjacent mobile belt revealed from 2-D and 3-D inversion of magnetotelluric data: Example from southern Congo craton in northern Namibia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (8), 4378–4397.

Lilley, F.E.M., Wang, L.J., Chamalaun, F.H., Ferguson, I.J. (2001). The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate. *GSA Monograph*, 201, 1–16.

Smith, R. (2014). Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012. *Surveys in Geophysics*, 35, 123–156.

References

Antsiferov, A.V. (Eds.). (2009). Geological and geophysical model Nemirovskaya-Kocharovskaya suture zone of the Ukrainian Shield. Donetsk: Weber. [in Russian]

Autio, U.A., Smirnov, M.Y., Smirnova, M., Bauer, T.E. (2020). Magnetotelluric array in the central Finnish Lapland II: 3-D inversion and tectonic implications. *Tectonophysics*, 794:228574. DOI:10.1016/j.tecto.2020.228574

Begg, G., Hronsky, J., Arndt, N. et al. (2010). Lithospheric, cratonic and geodynamic setting of Ni-Cu-PGE sulfide deposits. *Economic Geology*, 105, 1057–1070.

Berdichevsky, M.N., Dmitriev, V.I. (2008). Models and Methods of Magnetotellurics. Berlin Springer-Verlag Heidelberg.

V. Iliencko, PhD (Geol.)

e-mail: ivageophysicist@gmail.com

T. Burakhovich, Dr. Sci. (Geol.)

e-mail: burakhovich@ukr.net

A. Kushnir, Dr. Sci. (Geol.)

e-mail: antonn@ukr.net

Institute of Geophysics NAS of Ukraine,

32 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

Bologna, M., Padilha, A.L., Pádua, M.B., Vitorello, I., Chamalaun, F.H. (2014). Paraguay-Araguaia Belt Conductivity Anomaly: A fundamental tectonic boundary in South American Platform imaged by electromagnetic induction surveys. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15 (3), 509–515. DOI:10.1002/2013GC004970.

Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu., Sheremet, E.M., Shirkov, B.I. (2015). Geoelectric anomalies of the Ukrainian shield and their relation to mineral occurrences. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37 (6), 42–63. [in Russian]

Burakhovych, T., Iliencko, V., Kushnir, A. (2022). Three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 44 (4). [in Ukrainian]

Geological state map of the crystalline base of the scale of 1:200 000. Sheet M-35-XXIV (Skvira), (2005). Kyiv: Foundation of GP "Ukrainian Geological Company". [in Ukrainian]

Gintov, O.B., Orluk, M.I., Entin, V.A., Pashkevich, I., Mychak, S.V., Bakarzhieva, M.I., Shimkiv, L.M., Marchenko, A.V. (2018). The structure of the Western and Central parts of the Ukrainian shield. Controversial issues. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(6), 3–29. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i6.2018.151000 [in Ukrainian]

Ilchenko, T.V., Sologub, N.V., Tripolsky, A.A., Chekunov, A.V. (1988). Lithosphere of Central and Eastern Europe: Geographers IV, VI, VIII. Kyiv: Nauk. dumka. [in Russian]

Ilyenko, V., Burakhovich, T., Kushnir, A., Popov, S., Omelchuk, O. (2020). Magnetotelluric and magnetovariate researches in the endocontact area of Kominsky granite array. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 88(1), 46–52. http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.07 [in Ukrainian]

Ilyenko, V.A., Kushnir, A.M., Burakhovich, T.K. (2019). Electromagnetic studies of Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41 (4), 97–113. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i4.2019.177370 [in Ukrainian]

Khoza, T.D., Jones, A.G., Muller, M.R., Evans, R.L., Miensoopust, M.P., Webb, S.J. (2013). Lithospheric structure of an Archean craton and adjacent mobile belt revealed from 2-D and 3-D inversion of magnetotelluric data: Example from southern Congo craton in northern Namibia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118 (8), 4378–4397.

Lilley, F.E.M., Wang, L.J., Chamalaun, F.H., Ferguson, I.J. (2001). The Carpentaria electrical conductivity anomaly, Queensland, as a major structure in the Australian Plate. *GSA Monograph*, 201, 1–16.

Nikolaev, I.Y., Kushnir, A.M., Ilyenko, V.A., Nikolaev, Y.I. (2019). Electromagnetic studies of the western part of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41 (3), 120–133. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i3.2019.172433 [in Ukrainian]

Smith, R. (2014). Electromagnetic induction methods in mining geophysics from 2008 to 2012. *Surveys in Geophysics*, 35, 123–156.

Yatsenko, V. G. (2008). Geology, mineralogy and genesis of graphite of the Ukrainian shield. Kyiv: Logos. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.11.22

INTERPRETATION OF THE 3D GEOELECTRICAL MODEL OF THE INTERSECTION AREA OF THE ZVIZDAL-ZALISKA AND NEMYRIVSK FAULT ZONES

The interpretation of the deep three-dimensional geoelectrical model of the central part of the Zvizdal-Zaliska and Brusyliv fault zones of the Ukrainian shield, which was built with the involvement of data from experimental observations of the Earth's low-frequency electromagnetic field conducted in 2019 by the Institute of Geophysics named after S.I. Subotin of the National Academy of Sciences of Ukraine, within the Ordynsi-Lobachiv and Zoziv-Stryzhavka profiles was done. Experimental materials were processed with the PRC_MTMV software package, tipper estimates were obtained for periods of geomagnetic variations from 50 to 3400 s and curves of apparent resistivity (amplitude values and impedance phases) from 10 to 10000 s. Based on the qualitative analysis of magnetovariational profiling parameters, magnetotelluric sounding curves and pseudo-sections, several local near-surface structures of complex orientation in space were identified, which are confined to the Pogrebyschensky and Ogiivskyi faults, areas of separate parts of the Zvizdal-Zaliska, Brusyliv and Nemyriv fault zones, as well as their convergence, and outside the fault zones in the crystalline massive of the Ukrainian shield.

The main result of the geological-geoelectrical interpretation of the 3D model is the discovery of new anomalies of low resistivity in the near-surface part of the earth's crust (from the surface to 0.5–2 km), which correspond to the structural and metallogenic features of the study area; confirmation and detailing of the anomalously heterogeneous distribution of resistivity in the tops of the upper mantle at depths from 70 to 120 km west of the Ukrainian shield. The area of intersection of the Zvizdal-Zaliska and Nemyrivs fault zones is characterized by both a galvanically connected spatially diverse system and local separate near-surface anomalies with low resistivity from 5 to 100 Ohm-m, most of which dip to 0.5–1 km.

It is shown that there are connections between conductivity and structural features of the Zvizdal-Zaliska, Brusyliv and Nemyriv fault zones. In addition, some anomalies are found in the granite migmatites of the Ros' structural-formation zone, outside the tectono-metasomatic minerogenic zones. As a rule, anomalies are confined to zones of disintegration of crystalline basement rocks, elongated zones of metasomatization, and areas of distribution of graphitized rocks; moreover, some of the surface anomalies correspond to regions of weathering crusts. The conducted geological-geoelectrical analysis of the model showed that several areas require further study, namely the sub-latitude anomaly west of the Zoziv-Stryzhavka profile and the complex-shaped anomaly in the eastern part of the study area. As promising for the search for minerals, which meets the geoelectrical criteria, the area of the anomaly within the Brusyliv fault zone with a depth of up to 2 km is highlighted.

Keywords: geoelectromagnetic methods, three-dimensional model interpretation, conductivity anomalies, ore occurrences of minerals.

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.05>О. Краснікова, асп.
e-mail: koatinga@gmail.comС. Вижва, д-р геол. наук, проф.
e-mail: vsa@univ.net.uaКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ФОРМУВАННЯ ШВИДКІСНОЇ МОДЕЛІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ГІПОЦЕНТРУ МІКРОСЕЙСМІЧНОЇ ПОДІЇ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ГІДРОРОЗРИВУ ПЛАСТА

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

Присвячено аналізу особливостей визначальних етапів обробки даних мікросейсмічного моніторингу гідророзриву пласта. Обґрунтовано важливість наявності точної швидкісної моделі розрізу та етапи її створення. Надано класифікацію швидкісних моделей та вхідні дані, потрібні для їх побудови. Розглянуто групи методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події, їхні переваги, недоліки та фактори, що впливають на точність обчислень. Надано детальну характеристику окремих методів. Серед абсолютних – методів пошуку по сітці, лінеаризованої інверсії (Гейгера) та методів на основі продовження хвильових полів у середовище. Серед відносних – методів основної події (master-event method) та подвійної різниці (double-difference method). Представлено алгоритми застосування окремих методів. Наведено приклад порівняльної характеристики різних методів при виборі методики визначення гіпоцентру мікросейсмічної події.

Ключові слова: гідророзрив пласта, мікросейсмічний моніторинг, розв'язання оберненої задачі, швидкісна модель.

Постановка проблеми. Одним з аспектів забезпечення енергонеалежності України є нарощування ресурсної бази вуглеводнів за рахунок нетрадиційних колекторів, розробка яких вимагає впровадження методів інтенсифікації пласта, зокрема гідравлічного розриву (ГРП). Мікросейсмічний моніторинг є важливим для контролю якості проведення ГРП.

Мікросейсмічні методи набули значного поширення як у промисловій, так і в інженерній геофізиці. Спершу їх застосовували в моніторингу шахтного видобутку та в геотермії, а згодом – і в контролі за гідророзривом пласта, за станом дамб та гідротехнічних споруд, у моніторингу зберігання CO₂ тощо. Головним завданням обробки мікросейсмічної інформації є визначення гіпоцентру мікросейсмічної події (Краснікова та ін., 2021). У світовій практиці для розв'язання цієї задачі застосовується широкий спектр методів, вибір яких у кожному конкретному випадку здійснюється з урахуванням низки факторів, як от кількість та якість вхідної інформації, особливості вибраної модифікації польової розстановки тощо. Також важливо відзначити, що на відміну від даних активних методів сейсмозвідки для мікросейсмічних даних є невідомими час збудження та розташування джерела (Wu et al., 2018). Завдяки цьому багато методів класичної сейсмології застосовуються в обробці мікросейсміки нарівні з методами сейсмозвідки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дана стаття є частиною циклу публікацій, присвячених мікросейсмічному моніторингу гідророзриву пласта кафедри геофізики Інституту геології Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Lisny et al., 2021; Краснікова та ін., 2021).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Стаття висвітлює питання, пов'язані з особливостями відбору даних та алгоритмом створення швидкісної моделі для роботи з даними мікросейсмічного моніторингу, а також класифікацію та специфіку використання ряду методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події. Варто зазначити, що в публікаціях українською мовою спостерігається брак інформації із цього питання.

Мета досліджень – огляд окремих етапів обробки мікросейсмічної інформації, а саме: побудови швидкісної моделі та методів визначення гіпоцентру мікро-

сейсмічної події, аналіз особливостей їх застосування, переваг і недоліків.

Особливості формування швидкісної моделі. Усі методи оцінки гіпоцентру спираються на точну фонову модель, створення якої входить у послідовність обробки даних мікросейсмічного моніторингу. Оскільки нетрадиційні колектори є переважно анізотропними через сланцюватість або тріщинуватість, використання правильних анізотропних моделей швидкості є важливим для мінімізації будь-яких систематичних помилок у розташуваннях гіпоцентрів. Для перевірки моделі потрібен алгоритм визначення гіпоцентрів калібрувальних подій, який має бути ідентичним методу, що використовується для визначення місцезнаходження виявлених подій (Eaton, 2018). Основні кроки створення моделі:

1. Побудова початкової апріорної моделі швидкості, яка визначає просторовий розподіл швидкостей повздовжніх і поперечних хвиль. Зазвичай початкова модель використовує дані каротажу. У випадках, коли дані каротажу свердловини відсутні або ненадійні, спочатку будується літологічна модель і наповнюється значеннями швидкостей, визначеними за іншими даними.

2. Модель швидкості може бути узагальнена для включення ефектів анізотропії та згасання. У випадку середовища, що характеризується вертикальною поперечною ізоτροпією (VTI), горизонтальною поперечною ізоτροпією (HTI) або нахиленою поперечною ізоτροпією (TTI), замість значень пружної жорсткості часто зручніше параметризувати фонову модель шляхом посилення значень V_p і V_s , використовуючи орієнтацію осі симетрії, а також параметри Томсена.

3. З використанням даних калібрування початкова модель швидкості коригується доти, поки не буде отримано правильне розташування гіпоцентра. Для налаштування моделі можна використовувати різні стратегії, починаючи від нелінійної інверсії та закінчуючи ручним налаштуванням параметрів. При застосуванні даних перфораційних вибухів розробляються процедури, що дають змогу мінімізувати різницю між розрахованим і спостереженим часом приходу P- і S-хвиль мікросейсмічних подій.

Варто зазначити, що на практиці калібрувальні події не завжди доступні. Виявлені мікросейсмічні події можна розглядати як альтернативу, що надає значну інформацію

про швидкості пружних хвиль. Можливе одночасне інвертування для параметрів швидкості та розташування гіпоцентру залежно від геометрії "джерело-приймач".

Важливим етапом калібрування швидкісної моделі є контроль якості. Наприклад, можливо стежити, щоб у кожному шарі співвідношення поперечних та повздовжніх швидкостей лишалося у фізично можливих рамках для гірських порід.

Швидкісні моделі поділяють на 1D, 2D та 3D моделі. Для створення одновимірних моделей зазвичай використовують крос-диполь або літологічний каротаж, за допомогою яких створюються основні границі поділу в моделі, після визначення яких кожному шару задається константа швидкості (середнє значення або медіана в межах шару) (Pike, 2014). Для побудови двовимірної швидкісної моделі використовують дані міжсвердловинної кореляції та структурні поверхні. Задаючи швидкості для кожного шару моделі, враховують кут залягання пластів. У тривимірній моделі враховують такі додаткові параметри, як фаціальні зміни, розривні порушення, а також азимутальні варіації, пов'язані з анізотропією.

Огляд методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події. Застосовувані для визначення гіпоцентру мікросейсмічної події методи можна поділити на абсолютні та відносні (Akram, 2020). Абсолютні методи оцінюють розташування гіпоцентру щодо фіксованої системи координат, тоді як відносні методи оцінюють розташування гіпоцентру відносно так званої основної події (мікросейсмічна подія з високим рівнем показника S/N, яка була локалізована раніше з високою впевненістю за допомогою будь-якого з абсолютних методів). Абсолютні методи поділяють на дві основні категорії:

- методи, основані на часі приходу;
- методи, основані на формі хвилі.

Методи, основані на часі приходу, використовують піки часів прибуття P- та S-хвиль. Присутність завад і невідома форма сигналів хвиль ускладнюють задачу визначення часу прибуття. Також варто брати до уваги розбіжності у визначенні часів різними операторами, що може впливати на достовірність результатів. На відміну від цього, методи, основані на формі сигналу, не вимагають вибору часу прибуття і можуть забезпечити більш сумісні результати. Однак на точність цих методів впливає відношення S/N та притаманні алгоритмічні помилки (наприклад, помилки моделювання форми сигналу). Крім того, ці методи можуть бути дорогими з погляду обчислень (Akram, 2020).

Залежно від застосування швидкісних моделей та можливості їх змінювати з урахуванням даних, що надходять, методи поділяють на три групи. Перша група – це найпростіші моделі із фіксованою швидкістю. Томографічні методи, що належать до другої групи, виникли в глобальній сейсмології для зменшення впливу похибок швидкісної моделі на гіпоцентри землетрусів. Те, що похибки швидкості можна пом'якшити шляхом обрахунку гіпоцентрів землетрусів відносно один одного – є основою для третьої групи методів, відомих як методи подвійної різниці (Grechka and Heigl, 2017).

Варто також згадати, що методи знаходження гіпоцентру будуть відрізнятися для наземної та свердловинної модифікації мікросейсмічного моніторингу.

Важливим аспектом визначення гіпоцентру мікросейсмічних подій є аналіз невизначеності. Через варіації у силі та амплітуді подій точність та достовірність результатів також буде різною. Тож застосування атрибутів, пов'язаних з контролем якості, дозволяє відібрати якісні дані та оцінити вплив невизначеності на результати

інтерпретації (Maxwell, 2014). Іншими факторами впливу є помилки у геометрії для визначення часів приходу та у швидкісній моделі.

Авторами проведений аналіз застосування окремих методів.

Метод пошуку по сітці. Алгоритм пошуку по сітці складається з генерації сітки з вузлами, пов'язаними з можливими гіпоцентрами, розділеними інтервалами dx , dy та dz , а також сітки початкових моментів, з інтервалом dt (Castellanos and Baan, 2013). Потім розраховується теоретичний час проходження хвилі від кожного вузла до приймачів і порівнюється з фактично спостережуваним часом прибуття. Розв'язок задачі відбувається за допомогою ітерацій по можливих часах та координатах джерела, а також створюється таблиця пошуку із цими теоретичними часами проходження для всіх можливих гіпоцентральных параметрів, щоб запобігти повторним обчисленням. Ця процедура дає оцінку максимальної правдоподібності гіпоцентральных параметрів (просторових координат і початкового часу). Варто зазначити, що точне визначення гіпоцентрів потребує хорошого азимутального перекриття, тому, наприклад, для розташування приймачів в одній свердловині під час свердловинної модифікації мікросейсмічного моніторингу вказаний метод використовувати не рекомендується, проте він надійно працює за наявності двох і більше свердловин або в поверхневій модифікації.

Метод лінеаризованої інверсії. Є одним із методів, оснований на часі приходу. Його розробив для визначення гіпоцентру землетрусу ще Гейгер (Geiger, 1912). Застосовують лінеаризований варіант рівняння часу приходу:

$$G \Delta m = \Delta \tau, \quad (1)$$

де $G = \frac{\partial t_k^i}{\partial m^i}$ – матриця $2N \times 4$, яка містить похідні за часом проходження щодо параметрів моделі (x, y, z, t_0); $\Delta m = [\Delta x \Delta y \Delta z \Delta \tau^0]^T$ – вектор параметрів моделі; $\Delta \tau = (\tau^0 - \tau^m)_k^i$ – різниці часів приходу.

Вважається, що часи приходу отримані з усіх N ресиверів (приймачів) для конкретної події. На практиці це часто неможливо через високе співвідношення S/N (Akram, 2020).

Оскільки рівняння (1) є перевизначеним, воно може бути розв'язане із застосуванням методу найменших квадратів

$$\Delta m = (G^T G)^{-1} G^T \Delta \tau. \quad (2)$$

Параметри моделі оновлюються ітеративно

$$m_{i+1} = m_i + \Delta m.$$

Узагальнений алгоритм застосування методу Гейгера включає такі кроки (Akram, 2020):

1. Встановити початкове m_0 для вектора параметрів гіпоцентру.

2. Визначити приймачі, для яких доступні часи прибуття P- та/або S-хвиль. На практиці складно надійно визначити часи прибуття P- і S-хвиль за наявності сильного шуму. Отже, вони обираються за даними з окремих приймачів (з хорошим S/N), щоб мінімізувати помилки.

3. Обчислити змодельований час прибуття t_m для поточного m_1 за допомогою відкаліброваної моделі та доступних приймачів (крок 2).

4. Обчислити G і τ , використовуючи спостережувані та змодельовані вибірки часів прибуття.

5. Обчислити оновлений параметр (m), використовуючи рівняння (2).

6. Перевірити критерій зупинки. Повторити кроки 3–5, доки не буде виконано критерій зупинки.

Методи на основі продовження хвильових полів у середовищі. Такий підхід до визначення просторових координат мікросейсмічних джерел або мікросейсмічних

подій нагадує побудову сейсмічних зображень геологічного середовища з використанням площинних сейсмограм центральних променів. У задачах розвідки родовищ вуглеводнів такі сейсмограми не реєструються безпосередньо в польових умовах, а обчислюються з використанням відповідного набору зареєстрованих площинних сейсмограм спільних точок збудження. Для побудови сейсмічних зображень геологічного середовища приймається модель випромінювальних елементів, якими можуть бути точкові або протяжні випромінювачі сейсмічної енергії. Водночас функція швидкості у середовищі має множник $1/2$.

У випадку мікросейсмічної емісії для побудови зображення мікросейсмічних джерел використовують дещо іншу модель. Вважається, що мікросейсмічні джерела є точковими, а їх сукупність визначає геометрію тріщин довільної форми, що утворилися внаслідок проведення ГРП. У цьому разі сейсмічне, або, точніше, мікросейсмічне зображення тріщинної зони, може бути побудовано шляхом сканування простору зображення із знаходженням у кожній точці середовища значень хвильової функції за рахунок продовження хвильового поля з поверхні спостережень у середовище. Положення гіпоцентру обчислюється за просторовим розташуванням точки максимальної амплітуди, швидкісна функція використовується без нормування. Такі функції можуть відповідати різним швидкісним моделям, наприклад середньошвидкісній або пластовій.

Однак під час побудови зображень мікросейсмічних подій виникає принципова проблема. Якщо для побудови сейсмічних зображень геологічного середовища за сейсмограмами центральних променів час початку випромінювання є константою, що дорівнює нулю, то для мікросейсмічних зображень часи початку випромінювання мікросейсмічних джерел не є константою. Більш того, їх значення априорно невідомі. Для вирішення цієї проблеми, крім просторового сканування області мікросейсмічного зображення, необхідно провести сканування за часом для кожної просторової точки мікросейсмічного зображення. Це дозволяє визначити часи початку випромінювання мікросейсмічних джерел. Достовірність мікросейсмічних зображень тріщинної зони у даному випадку підвищується разом із збільшенням кількості приймачів мікросейсмічних хвиль.

Для продовження хвильових полів у середовище використовуються різні способи, зокрема, різницевий, спектральний та інтегральний, що базується на використанні інтеграла Кірхгофа.

Як і в інших методах, для точної оцінки розташування гіпоцентру мікросейсмічної події потрібні точна швидкісна модель та достатньо низький рівень завад (Akram, 2020).

Відносні методи визначення гіпоцентру мікросейсмічної події. Недосконала швидкісна модель є одним з основних факторів, що впливають на точність абсолютних методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події. Однак вплив невідомої структури швидкостей і систематичних похибок на час прибуття можна мінімізувати шляхом відносного знаходження розташування сусідніх мікросейсмічних подій (Akram, 2020). Мікросейсмічні події із сигналами великої амплітуди можуть використовуватися як основні події. Тоді взаємна кореляція може знайти більш слабкі сигнали з меншою амплітудою з подібними характеристиками форми хвилі, що й основні події. Цей метод ефективний для виявлення подібних подій, а також дозволяє визначити розташування події відносно головної події (Maxwell, 2014).

Застосування основної події ґрунтується на припущенні, що помилки у швидкісній моделі рівні для спостережень за двома повторюваними подіями в одному місці. Це припущення зазвичай залишається справедливим, якщо відстані між подіями є незначними порівняно з відстанями між подіями та пунктами. Отже, цей метод можна застосувати лише до сейсмічних подій у межах обмеженого об'єму поблизу основної події (Grigoli et al., 2016).

Найпоширенішими відносними методами є метод основної події (master-event method – MEM) та метод подвійної різниці (double-difference method – DDM). MEM оцінює розташування гіпоцентру мікросейсмічних подій відносно основної події, тоді як DDM розглядає кожну подію у кластері як основну. І MEM, і DDM припускають, що розподіл гіпоцентрів між подіями є невеликим порівняно із відстанню джерело-приймач і розміром будь-якої неоднорідності швидкості вздовж траєкторії променя (Akram, 2020). Одним з обмежень MEM є вимога, щоб основна подія була записана на більшості приймачів у масиві. Іншим обмеженням цього методу є те, що можна використовувати лише час прибуття, доступний як для вторинної події, так і для головної події. Також розрахунок гіпоцентру основної події має бути проведений незалежно від інших. Метод подвійної різниці долає обмеження MEM, оскільки кожна подія в мультиплетному кластері розглядається як основна. Перевагою відносних методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події є можливість їх застосування за низьких значень параметра "сигнал-шум". Їхні особливості, включаючи точність апроксимації променів, роблять їх придатними для наземного мікросейсмічного моніторингу (Jiang et al., 2019).

Розглянемо метод подвійної різниці (рис. 1), описаний у статті (Waldhauser and Ellsworth, 2000).

Для пари мікросейсмічних подій різниця між спостереженими та розрахованими часами проходження хвиль d_k^{ij} записується

$$d_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^{\text{спост}} - (t_k^i - t_k^j)^{\text{розрах}}, \quad (3)$$

де $t_k^{\text{спост}}$ та $t_k^{\text{розрах}}$ – спостережені та розраховані часи проходження хвиль для подій i та j для k -того спостереження.

Рівняння (3) автори визначають як подвійну різницю. Рівняння для зміни гіпоцентральної відстані між двома подіями i і j записується як

$$\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \Delta m^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial m} \Delta m^j = d_k^{ij}, \quad (4)$$

де $\Delta m^i = (\Delta x^i, \Delta y^i, \Delta z^i, \Delta t^i)$ – для просторових координат та часу виникнення події i .

Для охоплення всіх точок спостережень (сейсмостанцій) дане рівняння для всіх пар мікросейсмічних подій об'єднується у систему лінійних рівнянь у формі

$$WG\Delta m = W\Delta d, \quad (5)$$

де G – матриця розміру $M \times 4N$ (M – кількість спостережень подвійної різниці; N – кількість подій), що містить часткові похідні; d – вектор даних, що містить подвійні різниці; Δm – вектор довжини $4N$, що містить зміни гіпоцентральної параметрів, які потрібно визначити; W – діагональна матриця для зважування кожного рівняння.

Для рівняння застосовується обмеження

$$\sum_{i=1}^N \Delta m^i = 0. \quad (6)$$

Гіпоцентральної параметри оновлюються ітеративно, доки Δm^i не стане дуже малим або не буде виконано критерій зупинки.

Як вихідне припущення можуть бути використані розрахунки положення гіпоцентру за допомогою абсолютних методів (наприклад, описаного вище методу Гейгера) (Akram, 2020).

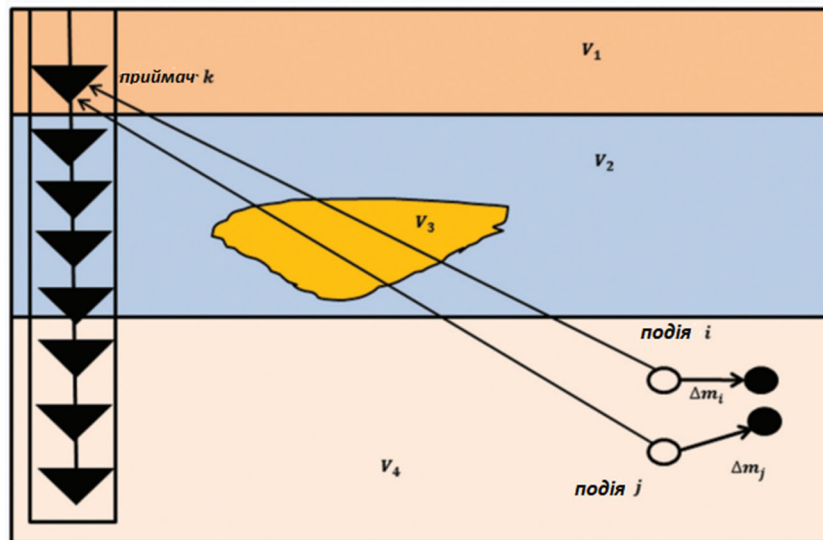


Рис. 1. Алгоритм подвійної різниці (Castellanos and Baan, 2013).

Для двох подій i та j показано початкові місця (незафарбовані кола), переміщення (зафарбовані кола) і відповідні шляхи променів до станції k . Товсті стрілки (Δt_i та Δt_j) позначають відповідні вектори переміщення

Питання вибору методики визначення гіпоцентру.

Вибір між методами визначення гіпоцентру мікросейсмічної події має здійснюватися безпосередньо для конкретної роботи з урахуванням низки факторів, зокрема: комплексу наявних вхідних даних, особливостей польового етапу робіт, економічних та часових факторів, попереднього досвіду у проведенні мікросейсміки на території тощо.

У роботі (Akram, 2020) наводиться приклад порівняння трьох методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події (метод Гейгера, MEM, DDM) для свердловинної розстановки з 12 приймачами, розташованими у двох

вертикальних свердловинах (рис. 2). Для розрахунків було використано одновимірну швидкісну модель.

Як видно з рисунка, відносні розташування гіпоцентрів, отримані за допомогою MEM і DMM, точніші, ніж абсолютні. Як для абсолютних, так і для відносних значень помилки в глибині є більшими, ніж по латералі. Середньоквадратична похибка є найменшою для методу подвійної різниці. Жоден з методів не компенсує похибки в обчисленні швидкості повною мірою. Отже, щоб з точністю визначити гіпоцентри, потрібне коригування швидкісної моделі.

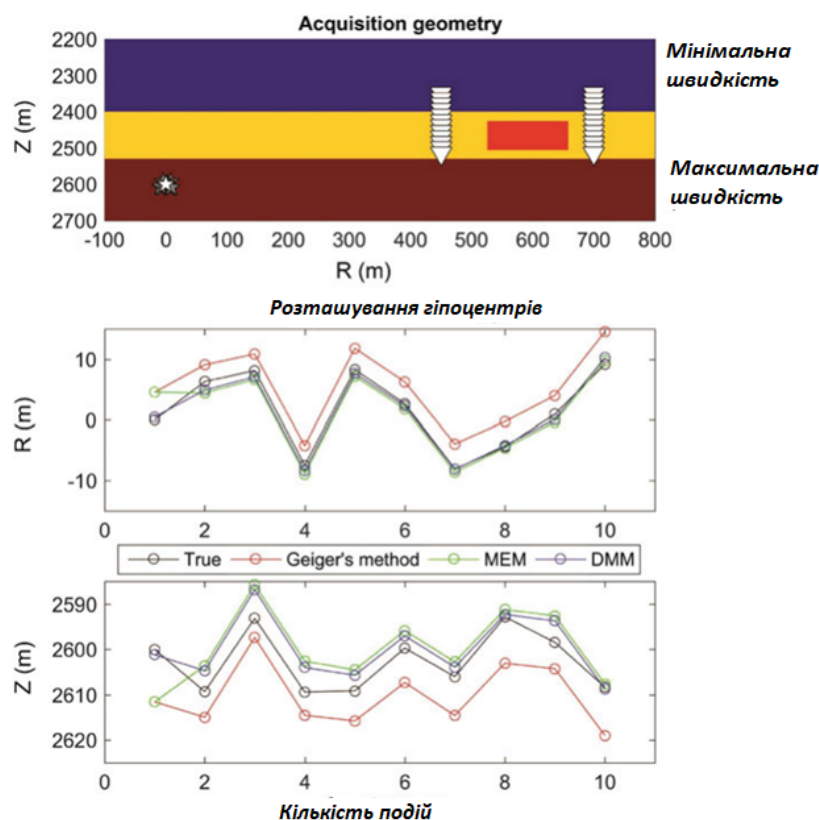


Рис. 2. Порівняння абсолютних та відносних методів визначення гіпоцентру мікросейсмічної події (за (Akram, 2020))

Висновки. У роботі проаналізовано сучасні методи визначення положення гіпоцентру мікросейсмічної події. Наведено особливості швидкісних моделей, яких потребують більшість методів. Описано класифікації методів за різними критеріями та наведено особливості, переваги й недоліки кожної з категорій.

Автори приводять детальний опис методу Гейгера, методів на основі продовження хвильових полів у середовище, методу подвійної різниці. Ці методи знаходять широке використання у світовій практиці мікросейсмічних досліджень. Перед вибором того чи іншого методу варто проаналізувати низку факторів: основну мету виконання проєкту, вимоги та обмеження, зазначені в технічному завданні, доступні вхідні дані, наявний об'єм коштів та час, виділений на виконання обробки мікросейсмічних даних тощо. Наприклад, для наземного мікросейсмічного моніторингу з обмеженими даними щодо швидкостей у розрізі (нестачі релевантного каротажу, недостатньо точній швидкісній моделі) буде доцільним використання методу подвійної різниці.

Список використаних джерел

- Краснікова, О., Лісний, Г., Вижва, С. (2021) Сучасний стан застосування методів мікросейсмічного контролю за проведенням та якістю ГРП. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 95 (4), 64–71. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.95.08>
- Akram, J. (2020). Understanding Downhole Microseismic Data Analysis: With Applications in Hydraulic Fracture Monitoring, Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-34017-9
- Castellanos, F., Baan, M. (2013). Microseismic event locations using the double-difference algorithm. *CSEG Recorder*, 38, 26–37.
- Eaton, D. (2018). Passive Seismic Monitoring of Induced Seismicity: Fundamental Principles and Application to Energy Technologies. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316535547
- Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ.*, 8, 60–71.
- Grechka, V. I., Heigl, W.M. (2017). Microseismic monitoring, Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.
- Grigoli, F., Cesca, S., Krieger, L., Kriegerowski, M., Gammaldi, S., Horalek, J., Priolo, E., Dahm, T. (2016). Automated microseismic event location using Master-Event Waveform Stacking. *Sci Rep.*, 17, 6:25744. DOI: 10.1038/srep25744
- Jiang, Y., Wang, R., Chen, X., Chu, F., Yin, C. (2019). Relative source location using a local equivalent path strategy for surface microseismic monitoring. *Geophysical Journal International*, 216 (2), 1233–1244. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy482>
- Maxwell, S. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. Society of Exploration Geophysicists. DOI:10.1190/1.9781560803164.
- Lisny, G., Krasnikova, O., Vyzhva, S. (2021). Prospects of microseismic monitoring of hydraulic fracturing in Ukraine. *Conference Proceedings*, *Geoinformatics, May 2021*, Vol. 2021, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521145>
- Maxwell, S. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. Society of Exploration Geophysicists. DOI:10.1190/1.9781560803164.
- Pike, K.A. (2014). Microseismic Data Processing, Modeling and Interpretation in the Presence of Coals: A Falher Member Case Study (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB. DOI:10.11575/PRISM/26910
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1353–1368. DOI:10.1785/0120000006
- Wu, S., Wang, Y., Zheng, Y., Chang, X. (2018). Microseismic source locations with deconvolution migration. *Geophysical Journal International*, 212 (3), 2088–2115. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx518>

Geoinformatics, May 2021, Vol. 2021, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521145>

Pike, K.A. (2014). Microseismic Data Processing, Modeling and Interpretation in the Presence of Coals: A Falher Member Case Study (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB. DOI:10.11575/PRISM/26910

Waldhauser, F., Ellsworth, W. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1353–1368. DOI:10.1785/0120000006

Wu, S., Wang, Y., Zheng, Y., Chang, X. (2018). Microseismic source locations with deconvolution migration. *Geophysical Journal International*, 212 (3), 2088–2115. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx518>

References

- Akram, J. (2020). Understanding Downhole Microseismic Data Analysis: With Applications in Hydraulic Fracture Monitoring, Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-34017-9
- Castellanos, F., Baan, M. (2013). Microseismic event locations using the double-difference algorithm. *CSEG Recorder*, 38, 26–37.
- Eaton, D. (2018). Passive Seismic Monitoring of Induced Seismicity: Fundamental Principles and Application to Energy Technologies. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316535547
- Geiger, L. (1912). Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. *Bull. St. Louis Univ.*, 8, 60–71.
- Grechka, V. I., Heigl, W.M. (2017). Microseismic monitoring, Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists.
- Grigoli, F., Cesca, S., Krieger, L., Kriegerowski, M., Gammaldi, S., Horalek, J., Priolo, E., Dahm, T. (2016). Automated microseismic event location using Master-Event Waveform Stacking. *Sci Rep.*, 17, 6:25744. DOI: 10.1038/srep25744
- Jiang, Y., Wang, R., Chen, X., Chu, F., Yin, C. (2019). Relative source location using a local equivalent path strategy for surface microseismic monitoring. *Geophysical Journal International*, 216 (2), 1233–1244. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy482>
- Krasnikova, O., Lisny, G., Vyzhva, S. (2021). Current state of application of hydraulic fracturing microseismic monitoring methods. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 95(4), 64–71. DOI: 10.17721/1728-2713.95.08 [in Ukrainian]
- Lisny, G., Krasnikova, O., Vyzhva, S. (2021). Prospects of microseismic monitoring of hydraulic fracturing in Ukraine. *Conference Proceedings, Geoinformatics, May 2021*, Vol. 2021, 1–6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521145>
- Maxwell, S. (2014). Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing: Improved Engineering of Unconventional Shale Reservoirs. Society of Exploration Geophysicists. DOI:10.1190/1.9781560803164.
- Pike, K.A. (2014). Microseismic Data Processing, Modeling and Interpretation in the Presence of Coals: A Falher Member Case Study (Unpublished master's thesis). University of Calgary, Calgary, AB. DOI:10.11575/PRISM/26910
- Waldhauser, F., Ellsworth, W. (2000). A Double-Difference Earthquake Location Algorithm: Method and Application to the Northern Hayward Fault, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, 1353–1368. DOI:10.1785/0120000006
- Wu, S., Wang, Y., Zheng, Y., Chang, X. (2018). Microseismic source locations with deconvolution migration. *Geophysical Journal International*, 212 (3), 2088–2115. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx518>

Надійшла до редколегії 07.04.23

O. Krasnikova, PhD Student
e-mail: koatinga@gmail.com

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
e-mail: vsa@univ.net.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

VELOCITY MODEL CREATION AND THEORETICAL BASICS OF THE METHODS OF DETERMINING THE HYPOCENTER OF A MICROSEISMIC EVENT WHILE PERFORMING HYDRAULIC FRACTURING

The article is devoted to the analysis of the characteristics of the determining stages of data processing of microseismic monitoring of hydraulic fracturing. The importance of having an accurate velocity model and the stages of its creation are substantiated. A classification of velocity models and the input data required for their creation are provided. Groups of methods for determining the hypocenter of a microseismic event, their advantages, limitations and factors affecting the accuracy of calculations are considered. A detailed description of specific methods is given. Among the absolute methods are grid search methods, linearized inversion (Geiger) and methods based on the extension of wave fields into the medium. Among the relative methods are the master-event method and the double-difference method. Algorithms for the application of specific methods are given. An example of the comparative characteristics of various methods when choosing a method for determining the hypocenter of a microseismic event is provided.

Keywords: hydraulic fracturing, microseismic monitoring, inverse problem solving, velocity model.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 553.042

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.06>

N. Sattar-zadeh

e-mail: nigar-23@mail.ru

N. Imamverdiyev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), prof.

e-mail: inazim17@yahoo.com

Baku State University,

33 Z. Khalilova Str., Baku AZ 1148, Republic of Azerbaijan

THE PECULIARITIES OF THE MAIN ORE-FORMING COMPONENTS DISTRIBUTION
IN THE FILIZCHAY FIELD OF THE SOUTHERN SLOPE OF THE GREATER CAUCASUS*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)*

The article has been devoted to the distribution of the main ore-forming components in Filizchay field of the southern slope of the Greater Caucasus. 3D model of the mineral elements of Filizchay field has been using "Leapfrog GEO" program. Analysis of the iso-thicknesses map clearly shows that the eastern flank of the deeper, shallow dipping part of the deposit is characterized by the greatest thickness where its thickness exceeds practically universally average value of this parameter according to the field. It has been found that zinc and lead distributions repeat practically each other. The western half of the body differs sharply from the eastern half by stable high (more than average value) contents. The overwhelming majority of zinc concentrations minimums and nearly all lead minimums are located in the eastern half which is generally characterized by the contents being below average. According to the copper concentrations distribution the deposit is very clearly divided into two parts – the southeastern part being thicker and richer and the northwestern part being relatively less thick and with contents being below average according to the field. The comparison of silver and lead isocontents' maps indicates a close relationship of both elements as evidenced by the very similar nature of their spatial distribution within the deposit. As well as for lead one can be generally distinguish two halves in it that are generally differed from each other in the intensity of the silver mineralization – the northwestern being richer and the southeastern being relatively poorer. The boundary between these parts repeats mainly the boundary determined for lead not only according to the spatial position but also according to the main details of the outline. All the maxima of the silver mineralization are located in the northwestern half of the field, the most of which are located on the upper horizons. According to the intensity degree of the zinc, lead and silver mineralization manifestation in the deposit, two parts can be distinguished: the western one is richer where almost all maxima are concentrated and the eastern one is poorer which accounts for the most of the minima. The boundary between them passes approximately in the middle part of the body from the upper to the lower horizons; it nearly coincides with the direction of its fall and it is distinguished by complex outlines. The frequent isolines repeatability of the zinc and lead contents, the close spatial position of their maxima centers suggest a close positive correlation between them.

Keywords: Filizchay field, the southern slope of the Greater Caucasus, 3D model of elements, "Leapfrog GEO" program, distributions of zinc, lead, copper, silver.

Introduction. The pyrite-polymetallic deposits are concentrated either among igneous rocks (mainly Ural, Altay, Lesser Caucasus types) or they are localized both among effusives and sedimentary strata ("Kuroko" types) or among sedimentary shale strata (the fields localized in the Jurassic shale strata of the Greater Caucasus).

Presently these families of the pyrite deposits are combined into three groups (Lobanova and Nekosb, 2017; Imamverdiyev et al., 2021; Lobanov and Yakubchuk, 2014; <https://www.sciencedirect.com>; <https://en.wikipedia.org>).

The first of them is closely connected with the volcanic rocks and it is accepted as a typical classical pyrite that is called VMS (Volcanogenic Massive Sulfide).

The second group which is connected with terrigenous-carbonate, terrigenous strata is called stratiform Pb-Zn deposits or SEDEX (Sedimentary Exhalative). The deposits of SEDEX groups type are currently main source of zinc, lead and silver (Emsbo et al., 2010; Goodfellow, Lydon, 2007; <https://www.sciencedirect.com>; <https://en.wikipedia.org>).

The third group is stratiform deposits in the carbonate formations. They are analogous of MVT (Mississippi Valley-Type).

If the origin of the first and the third groups of deposits in the literature has been sufficiently substantiated, the models have been built then there is no consensus on the origin of the second group of deposits. The most geologists support the concept of academician V.I. Smirnov – about the polygenic genesis of the pyrite-polymetallic deposits of the Greater Caucasus (Baba-zade et al., 1999, 2005, 2017; Smirnov, 1967).

Due to the above-mentioned the new stage in the pyrite deposits' research is development and construction of the

geological-genetic 3D models of the ore-forming systems on the basis of the geochemical data taken from boreholes. Based on the detailed mineralogical-geochemical data, the determination of the ore formation stages, referring them to some type of the pyrite deposits (VMS or SEDEX) and the clarification of the ore-forming systems' sources are very relevant in the modern geology.

The peculiarities of the geological structure of the Filizchay field. The meganticlinorium of the Greater Caucasus occupies a special place in the complicated heterogeneous structure of the Caucasian segment of the Mediterranean folded belt. Developed on the thin continental crust in contrast to typical ensialic island arcs it is characterized by the reduced magmatism with the overwhelming dominance of the sedimentary formations that are successively replaced each other in time – aspidite (black-shale), terrigenous-flyschoid and carbonate-flyschoid of the Jurassic-Paleogene age (Agayev, 1979; Geology of Azerbaijan, 2007; Kurbanov, 1982).

The available literature data and the huge factual material collected for more than 30 years of the Filizchay field's exploration and mainly in the southeastern Caucasus indicate that the early stage of the Alpine tectonic-magmatic cycle covers the Lower and Middle Jurassic after which the tectonic regime restructuring is occurred (Kurbanov, 1986). So an extensive sedimentary basin of the border sea type was formed during the Liassic-Aalenian within the Greater Caucasus where aspidite-shale and terrigenous-flyschoid formations with total thickness of more than 10 km were formed in the Early and Middle Jurassic (Geology of Azerbaijan, 2005; Kengerli, 2009).

The Speroza-Tufan and Zagatala-Govdag zones are distinguished in the megazone of the Southern slope of the Greater Caucasus according to T.N. Kengerli (*Geology of Azerbaijan, 2007*). The first zone within Azerbaijan is the axial structure of the Greater Caucasus. The Zagatala-Govdag flysch zone is downthrown along the Gamarvan fault. The megazone of the Southern slope has been bounded by the Krasnopolyan-Zangin deep fault from the south.

According to this author data the Tufan, Jikhikh-Dindidag, Mazym-Sarybash, Galal-Rustambaz and Megikan subzones are distinguished within the Speroza-Tufan uplift (*Geology of Azerbaijan, 2005*).

All known pyrite-copper-polymetallic deposits (Filizchay, Kasdag, Katekh, Jikhikh, Mazymchay, Cheder, Kasmalin) and ore occurrences (more than 70) are concentrated in the Lower-Middle Jurassic terrigenous strata of two longitudinal subzones – Tufan and Mazym-Sarybash. Their geological structure is distinguished by a number of the specific peculiarities within the Southern slope of the Greater Caucasus (Agayev et al., 2005; Baba-zade et al., 2005; Novruzov, 2016).

An analysis of the Jurassic and Cretaceous sedimentary formations of the considered territory has shown that they belong to the deposits of the graywacke, aspidite, terrigenous-flyschoid and multicolored terrigenous-carbonate-flyschoid formations according to the composition. The rocks of these formations form here three rhythmic complexes. From which the early (graywacke formation) and middle (aspidite and terrigenous-flyschoid formations) ones correspond to the Lower-Middle Jurassic development stage of the Alpine trough zone but the late rhythmic complex (multicolored formation) corresponds to its Upper Jurassic-Paleogene, marginal sea stage (Agayev, 1979; *Geology of Azerbaijan, 2007*; Kurbanov, 1982).

The structural position of the Filizchay field is determined by its confinement to the junction zone of the northern flank of the Karabachay coffer-shaped anticline with the Kekhamedan reverse-thrust that is complicated by the Balakyanchay local transverse inversion uplift. The main elements of the deposit structure are: the core of the Karabachay anticline, its northern flank and part of the Kekhamedan shear zone that are covered by the indicated transverse uplift. The peculiarities of these main structure elements determine the main features of the Filizchay field structure.

The main peculiarities of the Kasdag-Filizchay ore knot structure are:

- 1) The beginning of the modern structures' formation of the ore knot is connected with growth of the Kasdag and Karabachay longitudinal consolidated uplifts which have been separated by a narrow uncompensated trough during the Lower Jurassic where the eruptions of the initial basalts and ore exhalations have occurred. They have formed stratiform ore bodies of the considered ore knot deposits that are corresponded to the Pliensbach and Toarian centuries in time.

- 2) The following tectonic movements have already caused compensated trough origin of the Kekhamedan deep-seated upthrow-thrust shear zone in the site and the transformation of the brachiform uplifts into the Kasdag and Karabachay anticlines of the first order;

- 3) Three various aged, permanently alternating each other tectonic deformations stages can be distinguished within the ore knot. The first stage is preceded by the formation of dykes and sills of the first group and it corresponds in formation time to the first-order anticlines, the second-order linear folding, the second-order folding, flow cleavage, upthrow-thrusts; the stage is completed by the injection of the subvolcanic intrusions of the second group;

- 4) The second stage of the tectonic deformations has formed steep cleavage zones of the fault, contorted folds, ductile ruptures. It has created dikes boudinage of the first and second group and has complicated by the injection of the small intrusions of the third group gabbro-diorite association;

- 5) The third stage of the deformations led to the development of the transverse flexural bends and fault-shear faults, previously formed longitudinal linear folds, faults, flow cleavage and the secondary schistosity (Kurbanov, 1986).

The main peculiarities of the morphology of the pyrite-polymetallic deposit of the Filizchay field is that it is a single, compact sheet-like body being mainly composed (at 90–95%) of sulfide ores aggregates, the basis of which is pyrite and a far lesser degree sphalerite, galena, chalcopryrite and pyrrhotite (Novruzov, Sattar-zade, 2019). The carbonate minerals and even less – quartz, sericite and chlorite played a subordinate role in the deposit composition. The ore body lies among the monotonous clay shales of the upper – third bend of the Filizchay series.

The results discussion. 3D model of mineral elements of the Filizchay field was built using the Leapfrog GEO program which was developed specifically for geologists (<https://leapfrog3d.com>).

Using 3D models gives possibility to build a model of the field in a cross strike of the deposit (<https://leapfrog3d.com>). The geochemical model not only for one ore deposit but for all elements of the field was created by the means of 3D model and structures realized in the integrated package of "Leapfrog GEO" programs. The geochemical model according to the individual elements or due to assembly of the certain elements (for example, Cu + Zn + Pb) is built after creating 3D from the selected models of the Filizchay field elements. This block-diagram can rotate in different directions and it is possible to consider their full 3D field model.

The analysis of the thickness values distribution and the useful components content along the lateral, normal and down-dipping of the deposit was conducted for the purpose of characterizing the spatial variability of the mineralization. For this purpose, the isolines of the true thicknesses and contents of the valuable (Cu, Zn, Pb) components, their sum as well as the distribution of Ag having a high content for the deposit of the Filizchay field were built on the projection of the ore deposit on the horizontal plane. They were constructed on the basis of the above-mentioned "Leapfrog GEO" program (table, fig. 1–5).

The parameters of the complete ore intersections (wells and mine workings) – the total intersected thickness of the body and the average contents of useful components over the intersection, calculated according to the conditions within the geological deposit boundaries without including spotty-disseminated and massive copper-pyrrhotite ores were occurred as single observation. The traditional method of data interpolation between neighboring observations was used at constructing these isolines.

Analysis of the iso-thicknesses map clearly shows that the eastern flank of the deeper, gently sloping part of the deposit is characterized by the greatest thickness, where its thickness exceeds the average value of this parameter for the field almost everywhere. This part of the field is represented by an area of the increased and high thicknesses on the graph which has the form of a wide (400–300 m) and extended along the dip (more than 1000 m) 53 line, plunging into the plane of the body in a northeast direction approximately at 45° angle with respect to strike. The upper flat boundary of this line is determined by the position of the almost universally manifested bending of the deposit. Three maxima of the isometric outlook are

established within the line: two small ones in its upper part and one being the most significant in intensity and spatial development at the deepest explored horizons of the northeastern deposit flank. Updip described line continues

through a narrow pinch on the upper horizons of the western part of the field and it is expressed by the limited area of the increased thicknesses values with one small maximum (*Sattar-zade and Imamverdiyev, 2022; Novruzov, 2011*).

Table

Fragments of the results of the group samples analyzes for compiling a geochemical model of the Filizchay field

№ well	From-to, m	Cu %	Zn %	Pb %	S %	Ag g/t
26	117,3–126	0,48	10,5	3,95	40	90
30	400,9–411,9	0,3	9,9	5,75	42,9	140
56	409–412	0,29	3,74	0,88	42,9	90
57	383–388,3	0,68	3,3	1,2	38,9	25,8
67	554,3–564	0,56	4	1,47	38,9	29
68	303–309,5	0,81	3,88	1,5	41,8	44
70	253,8–264,5	3,7	0,55	0,28	39,5	150
310	189,2–199,1	0,51	7,12	3,3	45,5	43,4
312	119,7–131	0,7	6,25	2,55	39,1	48
314	251–260,3	0,53	4,12	1,74	36,8	36,8
315	151,1–163	0,55	3,85	1,6	38,2	43,8
342	303,9–313,3	0,63	1,63	0,44	35,3	22,6
349	385,9–391,5	0,8	2,2	0,76	38,7	36
360	134,6–144,5	0,53	5	1,9	43	62
374	202–216,4	0,53	6,75	1,65	42,7	36
404	335–346,6	0,41	4,75	2,24	43,6	46
416	86,1–90,4	0,3	2,24	0,24	29,3	25,6
443	458,3–469,4	0,8	1,81	0,55	36,7	23,2
444	290,6–303,6	0,48	4,95	1,42	39,5	60,3
469	302,8–316,3	1,22	2,57	0,64	36,3	9,1
515	756,3–762	0,53	3,65	1,87	45,1	80
528	505,6–513	0,48	2,7	1,55	29,7	46,6
555	657–661,6	0,34	0,8	0,22	30,5	40
558	199–206	0,78	2,9	0,96	40	24,6
560	860,8–864,9	0,4	1,57	0,27	42	21
575	781–785	0,43	6,6	0,52	37,2	47,2
583	876,2–877,1	0,47	1,16	0,71	42,4	3,1
584	664–667,2	0,9	1,84	0,42	34,6	20
592	756–762,8	2,4	1,05	0,08	38,5	10,4
594	952–960	0,63	0,13	0,28	45,8	28,8
600	836,1–844	0,42	1,73	0,44	37,9	16
605	188,8–192,9	0,42	5,39	1,82	37,3	72
606	197,6–202,6	0,32	8,25	3,09	41,1	71,4
608	273–280,4	0,47	1,03	0,25	43,3	2
611	273,6–275,5	0,33	3,13	0,93	40,4	17,8
620	252,4–254	0,38	6,12	2,87	37	82
624	178–188	0,96	0,03	0,84	41,7	20,5
644	245,4–258	0,37	10,52	2,81	37,6	67,8
659	475,4–476,6	0,43	7,02	2,28	39,7	45
668	288,5–297	0,54	1,31	1,3	42	60
670	709,1–710,3	0,16	0,48	1	40,9	55
676	731,4–737	0,63	0,69	0,14	41,4	600
696	522,8–530	0,33	5,86	1,82	38	70
698	344–352,4	0,7	5,66	3,04	34,1	80
703	581–588,9	0,29	2,37	0,64	39	35,4

The zinc and lead isoconcentrations' map (Fig. 1–2) clearly show that these elements distributions repeat practically each other. The western half of the body differs sharply from the eastern one by the stable increased (more than average value) contents. The overwhelming majority of zinc concentrations' minima and nearly all lead concentrations' minima are located in the eastern half that is mainly characterized by the below average contents. The boundary between two parts of the deposit is established by the position of the metal isoconcentrations lines. The subvertical one has a rather clear, generally upcoming to the linear form being typical for zinc and steep tortuous, more complex in outlines – for lead. The largest maximum of the zinc contents being elongated to a depth in the direction from southwest to northeast and spatially coinciding with one of the most significant thicknesses minima, is on the western periphery of the upper deposit part. The other very

small maxima are entirely distributed in the same western half of the deposit. The lead distribution is more complex here: the maxima of the contents are more numerous and the appearance of the part of them on the upper horizons is due to the development of oxidation and secondary enrichment processes. The comparative analysis of the values distribution of all three named parameters shows that in general the concentrations' minima are either overlapping with the thicknesses maxima or they are laying in the region of the increased values of the last ones. The mentioned circumstance indicates the existence of the feedback between the thickness and metals contents. The closeness of this relationship is not the same for different deposit parts and it will be estimated below. The frequent isolines repeatability of the zinc and lead contents, the close spatial position of their maxima centers suggests a close positive correlation between them.

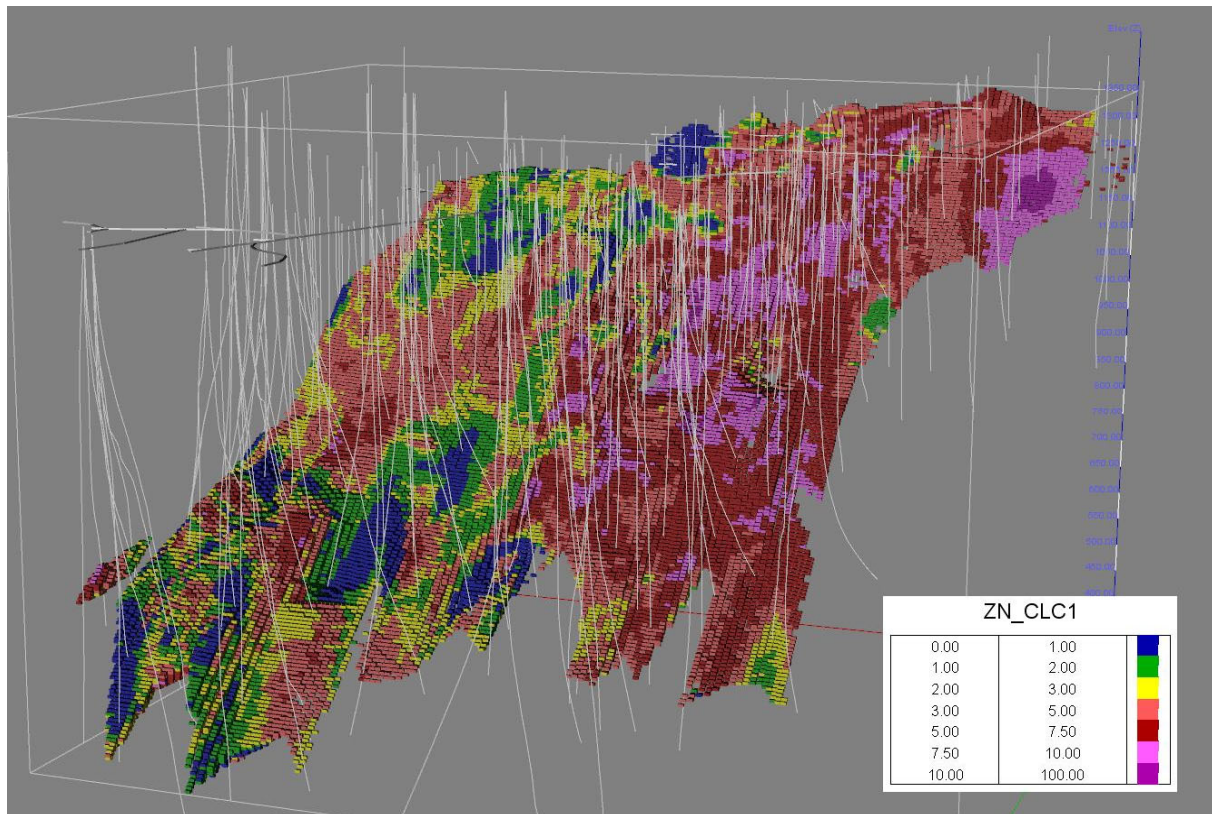


Fig. 1. The spatial distribution of zinc in the Filizchay field

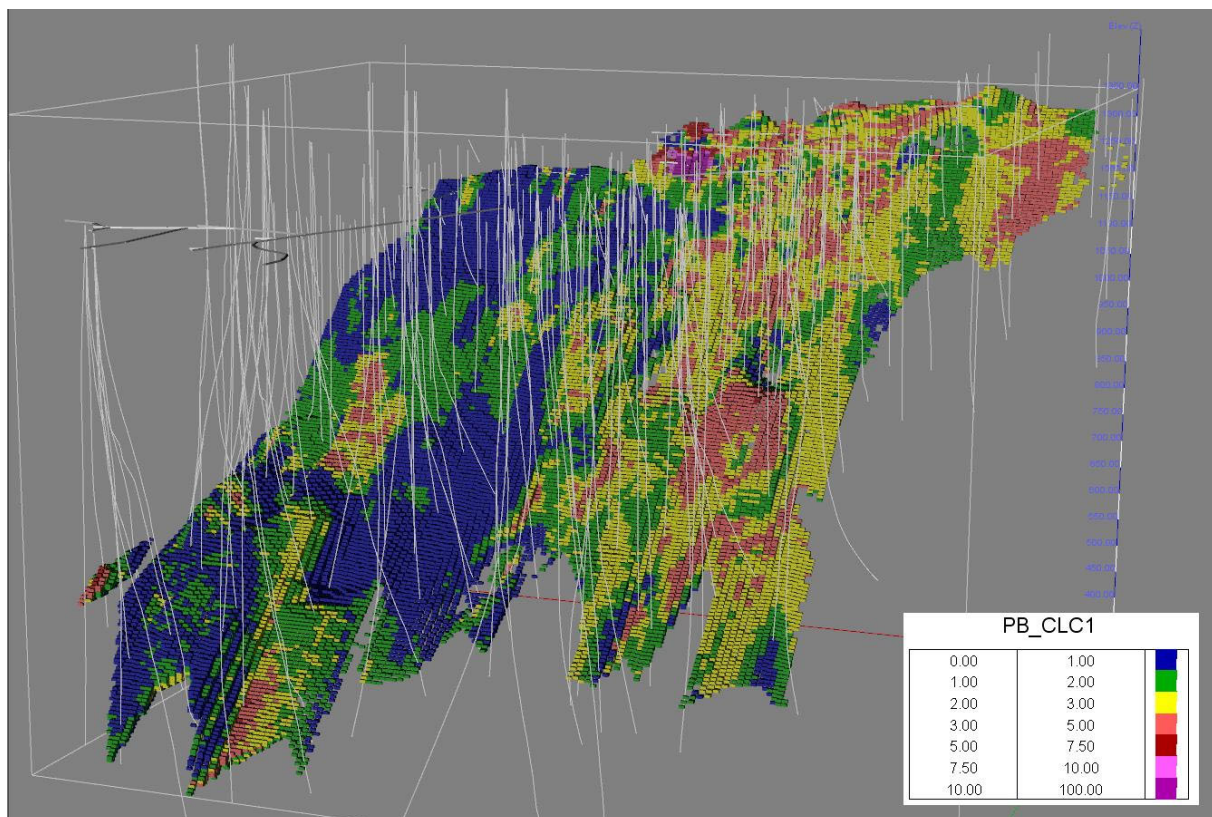


Fig. 2. The spatial distribution of lead in the Filizchay field

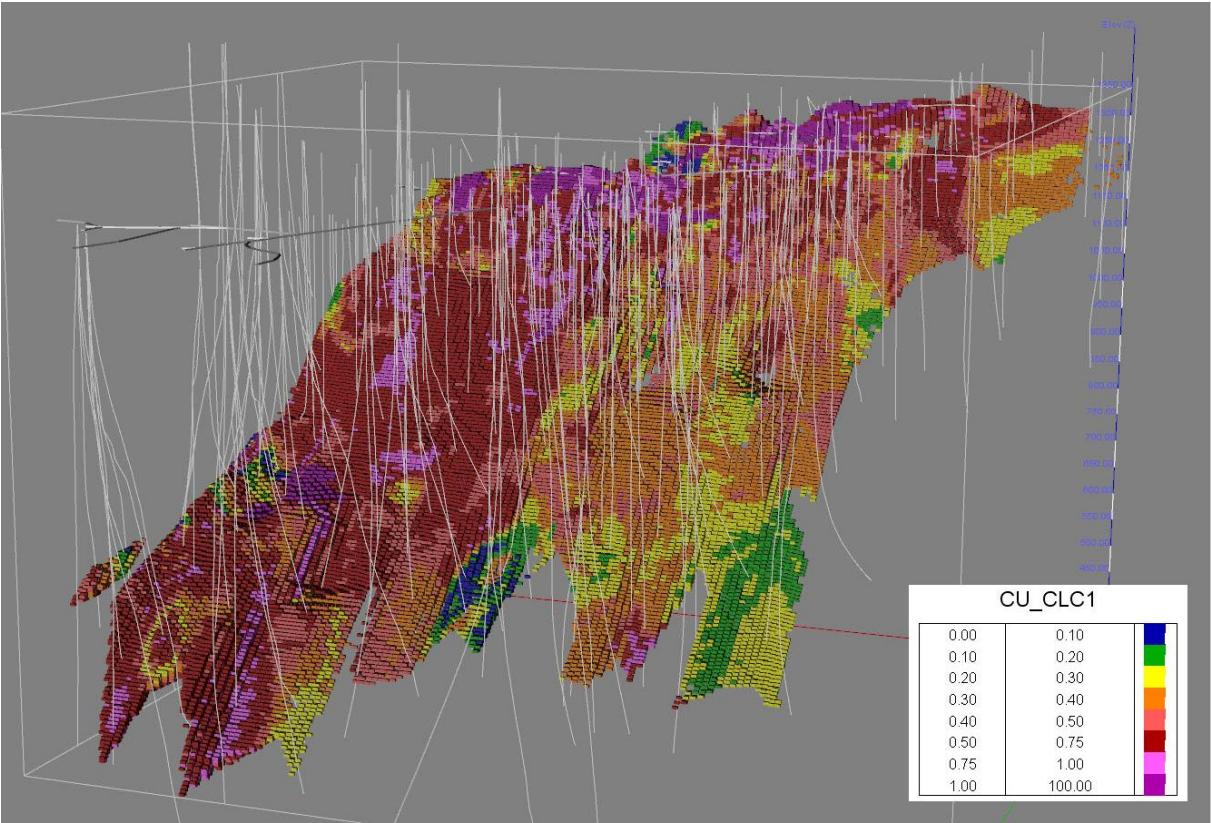


Fig. 3. The spatial distribution of copper in the Filizchay field

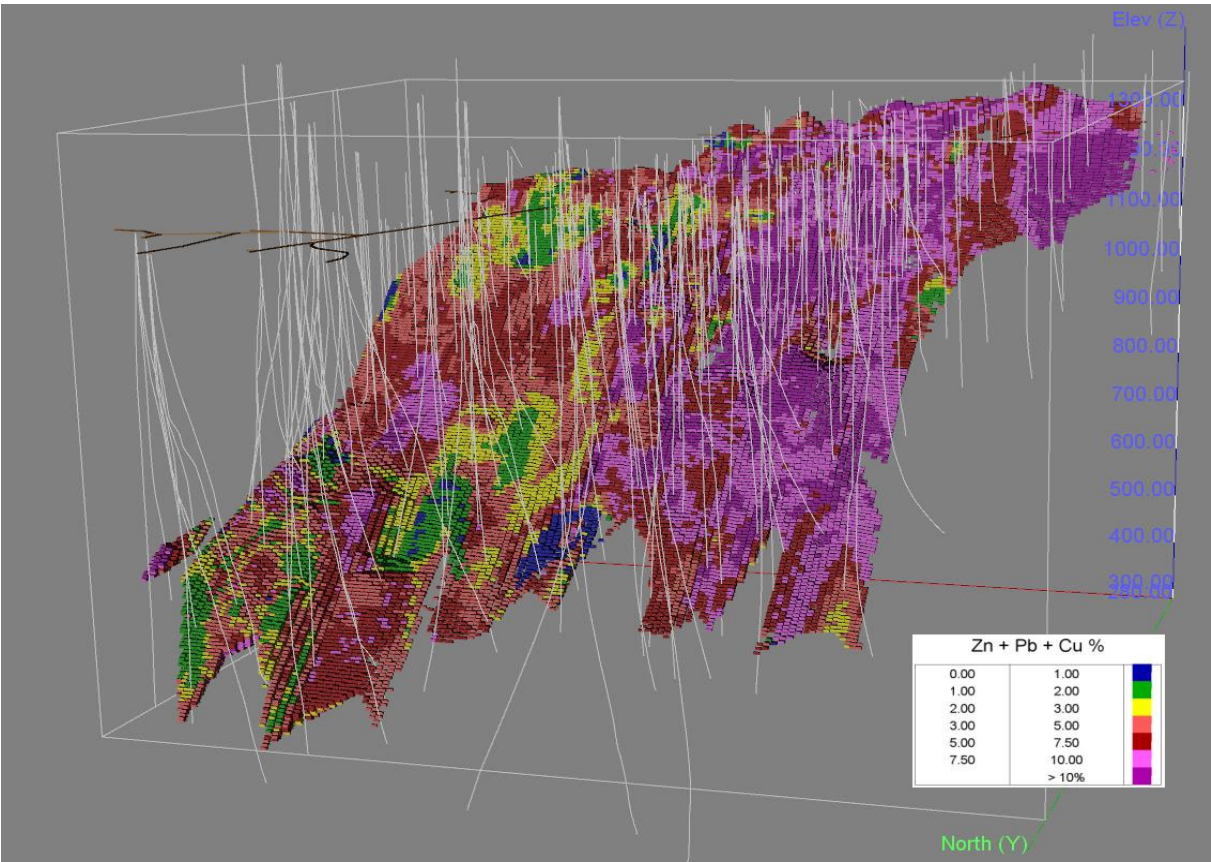


Fig. 4. The spatial distribution of zinc + lead + copper (%) in the Filizchay field

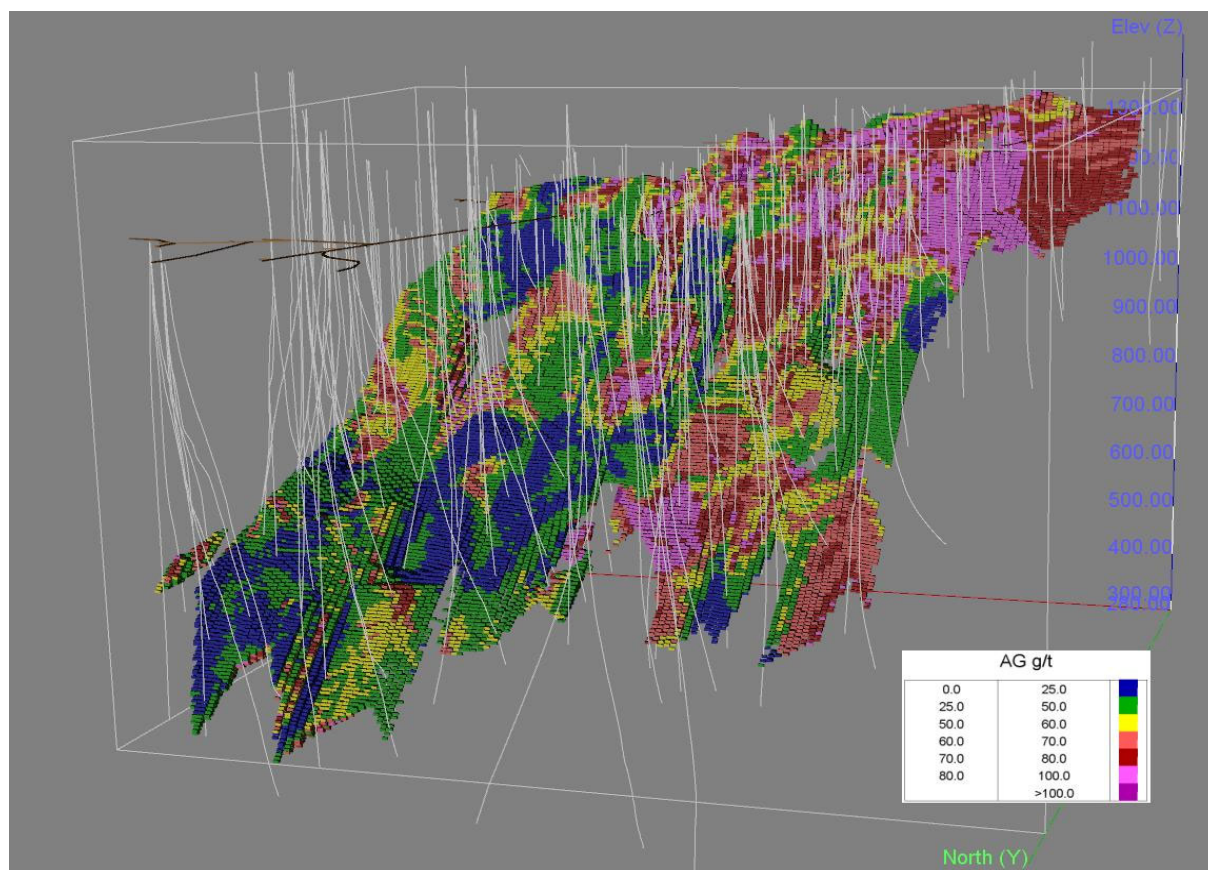


Fig. 5. The spatial distribution of silver in the Filizchay field

The behavior of the *copper* mineralization is completely different (Fig. 3). According to the distribution of the copper concentrations the deposit is very clearly divided into two parts: southeastern and northwestern. The boundary between them can be established diagonally in the plane of the ore body from the southwest (from its western flank in outcropping place) to the northeast (to the deepest horizons of the eastern periphery) approximately at 45° angle i.e. according to its declination. The southeastern half is occupied by the areas of the increased copper concentrations with the maximum in the eastern part within hypsometric marks of 600–700 m and several maxima elongated almost along the entire length near the surface which are arisen in connection with secondary enrichment processes. These areas have complex irregular outlines. In the generalized form they can be divided into two groups according to the conditions of occurrence. The flat line on the uppermost horizons with numerous "tongues" running to the shallow depth being perpendicular to the strike of the deposit belongs to the first group. The second group has been represented by three vast regions which are mainly located in the direction of the declination and having lines form. The last eastern line narrows sharply with depth turning into a narrow band with the same orientation. The areas with the ordinary contents are located between them. The total low content of copper and complete absence of the increased concentrations distinguish the northwestern half of the body. The minima being extensive in sizes and having mostly relatively simple isometric and elliptical shapes occupy about half of its area. All minima are located below 920 m, the westernmost of them is also the largest one in area. The copper concentrations distribution largely repeats the thicknesses distribution. So there are almost completely

coincided the main (general) diagonal boundaries passing through all deposits and dividing them into two halves being heterogeneous in content and thickness; the maxima of these parameters values located in the northeast of the deposit as well as the majority of the most significant minima are spatially close. The pattern being more complicated and irresponsible to this scheme in the southeastern part of the deposit is explained by the enrichment of the secondary copper minerals that are occurred at the upper horizons. Generally, the graphic material analysis clearly indicates the presence of the total positive relationship between the considered parameters.

The distribution of the *silver* is characterized by the great complication (Fig. 5). Comparing maps of the silver and lead isocontents is indicative of the close relationship of both elements as evidenced by the very similar nature of their spatial distribution within the deposit. As well as for lead two halves can be generally distinguished in it. They are generally different from each other in the intensity of the silver mineralization – the northwestern one being richer and the southeastern one being relatively poorer. The boundary between these parts repeats largely the boundary determined for lead not only according to spatial position but also according to the main details of the outline. It also has a complicated flexuous configuration and it runs approximately diagonally from the southwestern to northeastern corner of the deposit dipping to the northeast in the ore body plane. All the maxima of the silver mineralization are located in the northwestern half of the deposit. The most of which are distributed on the upper horizons. The extended (about 250 m) gentle line of the highest silver concentrations is located near the surface occupying all length of this half. It is connected with the

secondary enrichment of ores. Several small maxima are established areally towards the strike normal below it, the distribution of which is limited about 820 m depth. Finally two more maxima falling on the deep horizons of the central part of the deposit occupy the lowest position. Three minima being small in area are located in the western periphery of the body beginning from medium ones up to the maximum reached depths. The development of the minima, being significant in area and established in all investigated depths interval, is characterized for the southeastern half distinguishing by the general low silver content. Relatively high concentrations areas have the limited distribution mainly on the southeastern flank of the area and they are separated from the minima by wide lines of the ordinary contents. The western number of the minima marks the conventional boundary dividing the deposit into two parts.

The distribution of the *gold* concentrations in the most general terms is similar to the copper mineralization location. The maxima chain is located diagonally in the ore body plane that is subjected to the direction of the general subsidence from the southwest to the northeast. These maxima are developed across the entire range of the investigated depths dividing the field on the diagonal into two parts. The upper ones of the maxima are associated with the secondary enrichment. The lower ones reflect the primary zoning of the ore deposition. The wide development area of the minimum gold concentrations with a number of the deep minima can be distinguished below (northwest) of the chain adjacent to it. Another maximum appears at deep horizons in the northwestern part of the deposit. It is framed by the narrow gentle line of minimum contents values. Generally the southeastern (upper) half of the body is characterized by the greater intensity of the gold mineralization manifestation in comparison to the northwestern (lower) half that directly corresponds to the distribution of thicknesses in which the eastern part of the deposit is distinguished by the great thickness (thereby the secondary enrichment zone is not taken into consideration). Generally the gold contents maxima coincide with the thicknesses maxima in the above mentioned chain. The boundaries of the deposit separation according to the intensity degree of the gold mineralization and in terms of the thicknesses into richer, comparatively thick and relatively poor and thin halves are close to each other in spatial position and even in many outline details. This is especially true of the lower gently pitching part of the body where several maxima of the both parameters values are superimposed on each other.

Conclusion. Giving a brief overview of the conducted investigations we note that according to the analysis of the actual material the variability of the distributions of the thicknesses and copper content is the most contrasting. For which the deposit declination in the northeast direction is very clearly manifested during its falling to the north. This declination has been expressed by maxima and the increased values lines of the mentioned indicators as the individual lines or chain passing in the body plane from its southwestern to northeastern flanks. According to the distribution nature of the thicknesses and copper contents the deposit is clearly divided diagonally into two parts – the southeastern, thicker and richer part and the northwestern, relatively lower thickness and with contents being below the average over the deposit. According to the intensity degree of the manifestation of zinc, lead and silver mineralization in the deposit one can distinguish two parts: the western part is richer where almost all maxima are concentrated and the eastern part is poorer which accounts for the most of the minima. The boundary between them passes approximately

in the middle part of the body from the upper to lower horizons; it roughly coincides with the direction of its fall and is distinguished by complex outlines. The gold distribution is the most complex. The extensive area of low and minimum metal concentrations is distinguished in the middle part of the deposit beginning approximately from the level of the incidence angle change and below to the hypsometric mark of about 500 m. This area is framed (with the exception of the northwestern and southeastern angles) by a wide halo of the increased contents. It occupies all other area of deposit and within which many small maxima in size are located. The distribution of the main ore-forming components (zinc, lead and copper) in the horizontal section is illustrated on the plans of three horizons representing the upper, middle and deep parts of the deposit.

Reference

- Agayev, S.A., Velizade, S.F., Novruzov, N.A. (2005). Lead-zinc deposits of the Southern slope of the Greater Caucasus. In book: *Geology of Azerbaijan*. Vol.6. Minerals. Baku: Nafta-Press, 159–201.
- Agayev, V.B. (1979). Stratigraphy of the Jurassic deposits of the Azerbaijani part of the Greater Caucasus. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.-Min.)*. Baku.
- Baba-zade, V.M., Agayev, S.A. (1999). The peculiarities of the structural conditions of localization and morphology of the ore deposit of the Filizchay field. *Baku University, Series of natural sciences*, 1, 91–108.
- Baba-zade, V.M., Agayev, S.A., Chelabi, G.A. et al. (2005). Lead and zinc. Metallogenic province of the Greater Caucasus. In book: *Mineral resources of Azerbaijan*. Baku: Ozan, 294–340.
- Baba-Zade, V.M., Kekeliya, S.A., Abdullayeva, Sh.F. and others (2017). Ore deposits of the central segment of the Alpine mountain-fold belt and problems of their genesis (Greater and Lesser Caucasus, Eastern Pontides). Baku: CBS.
- Emso, Poul, Seal, R.R., Breit, G.N., Diehl, S.F. (2010). Sedimentary exhalative (sedex) zinc-lead-silver deposit model. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report*, 5070, 57, <http://dx.doi.org/10.3133/sir20105070N>
- Geology of Azerbaijan. (2005). Vol. 4. Tectonics. Alizade, A.A. (Ed.). Baku: Nafta-Press.
- Geology of Azerbaijan. (2007). Vol. I. Stratigraphy. Part 2. Mesozoic. Alizade, A.A. (Ed.). Baku: Nafta-Press.
- Goodfellow, W.D., Lydon, J.W. (2007). Sedimentary exhalative (SEDEX) deposits. In: Goodfellow, W.D. (Ed.) *Mineral deposits of Canada: a synthesis of major deposit types, district metallogeny, the evolution of geological provinces, and exploration methods. Geological Association of Canada Special Publication*, 5, 163–183.
- https://en.wikipedia.org/wiki/Sedimentary_exhalative_deposits
- <https://www.leapfrog3d.com>
- <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/exhalative-deposit>
- Imamverdiyev, N.A., Baba-zadeh, V.M., Mursalov, S.S., Valiyev, A.A., Mansurov, M.I., Abdullayeva, S.F. (2021). New perspective Reza gold deposit (Gedabek ore district, Lesser Caucasus, Azerbaijan). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30, 1, 53–64. doi.org/ 10.15421/112106
- Kangerli, T.N. (2009). Tectonic layering of the Alpine cover of the Greater Caucasus within Azerbaijan. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.-Min.)*. Baku.
- Kurbanov, N.K. (1982). The main formation stages of the combined copper-polymetallic fields and their relationship with the evolution stages of the Alpine terrigenous geosyncline of the Greater Caucasus. *Proceedings of TsNIGRI (Central Geological Research Institute)*. M.: is. 168, 3–18.
- Kurbanov, N.K. (1986). Formation conditions and location regularities of the stratiform pyrite-polymetallic deposits of the terrigenous eugeosynclines (on the example of the Alpine province of the Greater Caucasus). *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.-Min.)*. Moscow.
- Lobanov, K.V., Yakubchuk A.S. (2014). Besshi-Type VMS Deposits of the Rudny Altai (Central Asia). *Creaser Economic Geology*, 109, 1403–1430.
- Lobanova, K.V., Nekosb, V.V. (2017). SEDEX type deposits – the most important source of Zn, Pb and Ag in the world. Brief world review. Prospects of Russia and Krasnoyarsk region. *Engineering & Technologies, Siberian: Journal of Siberian Federal University*, 10 (7), 881–907.
- Novruzov N.A. (2016). Geochemistry of stratiform pyrite deposits in the Eastern segment of the Greater Caucasus. Baku: Nafta-Press.
- Novruzov, N.A. (2011). Admixture-elements and their use as geochemical indicators for search of the buried pyrite ores in the Greater Caucasus (Azerbaijan). *Mashad: Iranian Journal of Earth Sciences*, 3 (2), 91–97.
- Novruzov, N.A. (2011). The geochemical features of terrigenous host rocks at massive sulfide deposits in the eastern Caucasus. *Lithology and Mineral Resources*, 46 (5), 419–426.
- Novruzov, N.A., Sattar-zade, N.A. (2019). The distribution peculiarities of the main ores components in the three-dimensional space of Filizchay field (Greater Caucasus). In col.: *Problems of geology and expansion of the*

mineral resource base of Eurasia countries. The Institute of Geological Sciences named after K.I Satpaev, Almaty, p. 195–200.

Novruzov, N.A., Sattar-Zade, N.A. (2019). The main features of the mineralogical and geochemical peculiarities of the Filizchay field ores (Azerbaijan). *National Geology*, 2, 50–54.

Sattar-zade, N.A., Imamverdiyev, N.A. (2022). Geochemical peculiarities and deposit zoning of the Filizchay pyrite-polymetallic field (Southern slope of

the Greater Caucasus). *Proceedings of the higher educational institutions – North Caucasus region*.

Smirnov, V.I. (1967). Correlation between sedimentary and hydrothermal processes during pyrite ores formation in the Jurassic flyschoids of the Greater Caucasus. *Report USSR Academy of Sciences*, 177, 1, 179–181.

Надійшла до редколегії 24.12.22

Н. Саттар-заде

e-mail: nigar-23@mail.ru

Н. Імамвердієв, д-р геол.-мінералог. наук, проф.

e-mail: inazim17@yahoo.com

Бакинський державний університет,

Вул. 3. Халілова, 33, Баку AZ 1148, Азербайджан

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ОСНОВНИХ РУДОУТВОРЮВАЛЬНИХ КОМПОНЕНТІВ ФІЛІЗЧАЙСЬКОГО РОДОВИЩА ПІВДЕННОГО СХИЛУ ВЕЛИКОГО КАВКАЗУ

Досліджено розподіл основних рудоутворювальних компонентів Філізчайського родовища південного схилу Великого Кавказу. 3D модель елементів корисних копалин Філізчайського родовища виконана за допомогою програми "Leapfrog GEO". Аналіз карти ізотопів чітко показує, що найбільшою потужністю характеризується східний фланг більш глибокої, пологоспадної частини покладу, де її потужність перевищує середнє значення цього параметра по родовищу. Встановлено, що розподіли цинку і свинцю практично повторюють один одного. Західна половина корпусу різко відрізняється від східної стабільно високим (більшим за середнє значення) вмістом. Переважна більшість мінімумів концентрації цинку і майже всі мінімуми свинцю розташовані у східній половині, яка зазвичай характеризується низьким вмістом цих елементів. Відповідно до розподілу концентрації міді родовище дуже чітко розділене на дві частини: південно-східна частина є більш товстою та багатшою, а північно-західна частина має відносно меншу товщину та вміст елементу нижчий за середній по родовищу. Порівняння карт ізокоцентру срібла та свинцю свідчить про тісний зв'язок обох елементів та подібний характер їхнього просторового розподілу на родовищі. Так само, як і для свинцю, в ньому можна загалом виділити дві частини, які відрізняються одна від одної інтенсивністю мінералізації срібла – північно-західна більш багата і південно-східна відносно бідніша. Межа між цими частинами в основному повторює межу, визначену для свинцю, не тільки за просторовим положенням, але й за основними деталями контуру. Усі максимуми срібного зруденіння розташовані в північно-західній половині поля, більшість з них – на верхніх горизонтальних. За ступенем інтенсивності прояву цинкової, свинцевої та срібної мінералізації на родовищі можна виділити дві частини: більш багату західну – де зосереджені майже всі максимуми, і біднішу східну, на яку припадає більшість мінімумів. Границя між ними проходить приблизно в середній частині тіла від верхнього до нижнього горизонтів; вона майже збігається з напрямком її падіння і виділяється складними обрисами. Часта повторюваність ізоліній вмісту цинку і свинцю, близьке просторове розташування центрів їх максимумів свідчить про тісний позитивний зв'язок між ними.

Ключові слова: Філізчайське родовище, південний схил Великого Кавказу, 3D модель елементів, Leapfrog GEO, розподіл цинку, свинцю, міді, срібла.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.048

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.07>С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.
e-mail: vyzhvas@gmail.comМ. Курило¹, д-р геол. наук, доц.
e-mail: kurilo@univ.kiev.uaС. Паук², голова ДКЗ
e-mail: golova@dkz.gov.uaЮ. Ткаченко¹, асп.
e-mail: july.tkch@gmail.com¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;²Державна комісія України по запасах корисних копалин,
вул. Ген. Алмазова (Кутузова), 18/7, кімн. 816, м. Київ, 01133, УкраїнаЕКОЛОГІЧНІ ТА СОЦІАЛЬНІ РИЗИКИ В МІЖНАРОДНИХ ТА ВІТЧИЗНЯНИХ СИСТЕМАХ
ОЦІНКИ МІНЕРАЛЬНИХ РЕСУРСІВ*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)*

Визначено, що екологічні і соціальні ризики освоєння надр стали ключовими під час реалізації проєктів геологічного вивчення і промислового освоєння родовищ корисних копалин. Встановлено основні складові цих ризиків, які пов'язані з проблемами управління водними ресурсами, процесами декарбонізації виробництва, зменшення негативного впливу на зміну клімату, екологічності виробництва і обсягами викидів, які напряду або непрямо пов'язані з добувними підприємствами та ін. Проведено зіставлення вітчизняних і міжнародних стандартів оцінки запасів і ресурсів корисних копалин за базовими ознаками класифікації із визначенням соціальних і екологічних факторів оцінки. Аналізуються та порівнюються класифікаційні ознаки Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин Державного фонду надр, Рамкової класифікації ООН, Система управління нафтовими ресурсами PRMS, Міжнародні стандарти звітності Комітету мінеральних ресурсів CRIRSCO з метою встановлення ознак, які дозволяють визначати соціальні та екологічні ризики проєктів надрокористування. Наявність цих прямих ознак у класифікаційних системах свідчить про спрямованість стандартів оцінки до комплексної оцінки проєктів як таких, що відповідають цілям сталого розвитку.

Соціальні і екологічна життєздатність проєктів надр- і природокористування використовується як пряма ознака лише у Рамковій класифікації ООН, причому її включення відбулося в 2009 році в частині соціальних чинників, а в 2019 році – в частині екологічних. Ця класифікація розглядається як інструмент ефективного управління національними ресурсами, необхідним для реалізації цілей сталого розвитку, що дає можливість усім зацікавленим особам знаходити спільне розуміння розвитку ресурсів та територій, робити зіставлення проєктів у різних видах ресурсів і користування надрами. В інших міжнародних стандартах, які і у вітчизняній класифікації Державного фонду надр, соціально-екологічні критерії враховуються непрямим чином, що є одним з ключових напрямів розвитку цих систем оцінювання мінеральних ресурсів. Такий розвиток може відбуватися у двох напрямках: включення соціальних і екологічних критеріїв напряду як базових ознак, причому це можливо як у вигляді комплексних параметрів, так і окремих класів/підкласів; використання і вдосконалення існуючих методик вартісної оцінки ресурсів і запасів із врахуванням екологічних і соціальних ризиків реалізації проєктів надрокористування.

Ключові слова: міжнародні стандарти, оцінка запасів, екологічні і соціальні ризики, ознаки класифікацій, мінеральні ресурси, проєкти надрокористування.

Актуальність дослідження. Усі відомі міжнародні стандарти оцінки запасів і ресурсів, а також вітчизняні нормативні документи містять класифікації об'єктів за важливими геологічними та промисловими ознаками. Ці ознаки класифікацій виникають не випадково, і зазвичай відображають традиції та етапи геологічного вивчення та оцінки родовищ корисних копалин, які історично були розвинуті у конкретному регіоні.

Класифікація запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр встановлює принципи підрахунку, геолого-економічної оцінки та державного обліку запасів корисних копалин, загальних для державного фонду надр України за рівнем їх промислового значення, ступенем їх геологічного і техніко-економічного вивчення, підготовленості до промислового освоєння. Цей документ встановлює основні принципи кількісної оцінки мінеральних ресурсів (*Класифікація, 1997*) відповідно до видів корисних копалин і геолого-промислових типів родовищ. Для більшості вітчизняних геологів минулого століття традиційними ознаками класифікації запасів і ресурсів були ступінь геологічного вивчення та якість корисної копалини, яка враховувалась під час визначення балансової належності запасів. Практика використання чинної класифікації є більш розширеною і систематизує запаси і ресурси корисних копалин за

певними рівнями промислового значення та ступенем техніко-економічної та геологічної вивченості. Ця класифікація містить класи і підкласи, ідентифіковані за допомогою міжнародного трипорядкового числового коду. Сьогодні наша класифікація гармонізована з Рамковою класифікацією ресурсів ООН за версією UNFC 2009, незважаючи на те, що вже існує оновлена версія 2019 (*UNFC, 2019*).

Актуальність даного дослідження пов'язана з інтеграцією вітчизняного надрокористування у глобальні та європейські регіональні галузеві організації, а також у світові системи інвестування в гірничодобувні об'єкти. Вітчизняна мінерально-сировинна база включає багато корисних копалин із переліку критичних і стратегічних для США, Канади, Японії, Австралії, країн ЄС. Розуміння і доступність геологічної інформації, яка стосується наших об'єктів, прискорить прийняття рішень щодо їх інвестування та розвитку проєктів. Розуміння вимог міжнародних стандартів до розвідки родовищ дозволить 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. Аналіз систем класифікації дозволяє визначити напрями подальших змін та гармонізації

© Вижва С., Курило М., Паук С., Ткаченко Ю., 2023

національної системи оцінювання. Донедавна соціальні та екологічні чинники рідко враховувалися під час класифікації запасів і ресурсів корисних копалин. Їх значення значно зросло за останні кілька років. Багато проєктів було відкладено або скасовано через те, що вони не виправдали соціальних чи екологічних очікувань, навіть якщо вони відповідали всім іншим вимогам кількості, якості і прибутковості. Різноманітні чинники, залучені до класифікації ресурсів, не існують ізольовано, а діють комплексно. Зокрема, на конкретні питання прав власності і використання ресурсу, умови ліцензування та інші юридичні питання, які в результаті створюють і економічні умови, можуть впливати соціальні та екологічні ризики. Затримка, спричинена розв'язанням цих питань у зв'язку із соціально-екологічними проблемами, може мати значний вплив на економіку проєктів і навіть зробити їх економічно не вигідними (*UNFC and Social...*, 2022).

Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин завжди відображають найважливіші особливості проєктів корисних копалин, що визначають їхню ефективність. Із самого початку це були основні геологічні та гірничотехнічні характеристики, потім економічні та екологічні фактори. Тепер таким знаком є екологічний, соціальний, управлінський (ESG Environmental, social, and corporate governance), які безпосередньо впливають на можливість реалізації проєкту. Далі ми аналізуємо існуючі класифікації систем, щоб визначити прямі та непрямі шляхи, якими ці системи враховують фактори ESG.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спираються автори, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Міжнародні стандарти оцінки мінеральних ресурсів, як і вітчизняні нормативні документи, сьогодні публікуються у вільному доступі онлайн ресурсів, де можна відстежити їх ретроспективні зміни та актуальний стан (*Класифікація, 1997; UNFC, 2019; Petroleum Resources Management System, 2018; CRIRSCO, 2019 та ін.*). Оскільки Рамкова класифікація створена для гармонізації всіх можливих національних систем, то в останнє десятиліття запропоновані додаткові інструменти "перекладу", які відображені в так званих Bridging Documents (*Bridging Document, 2013, 2015*). Окремі публікації стосуються досвіду і перспектив використання стандартів оцінки в різних регіонах (*Camisani-Calzolari, 2002*), у тому числі й Україні (*Баряцька, 2020*). У деяких публікаціях 2015–2020 рр. є порівняння оцінок родовищ за різними стандартами, але вони стосувалися прикладів окремих родовищ або типів корисних копалин, де вони порівнювалися лише в межах 1–2 стандартів (*Рудько, 2017; Рудько та ін., 2018*).

Формулювання цілей статті. У цьому дослідженні аналізуються та порівнюються класифікаційні ознаки різних систем: Класифікація запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр (*Класифікація, 1997*), Рамкова класифікація ООН/UNFC United Nations Framework Classification for Resources (*UNFC, 2019*), Система управління нафтовими ресурсами/Petroleum Resources Management System PRMS (*Petroleum Resources Management System, 2018*), Міжнародні стандарти звітності Комітету мінеральних ресурсів/The Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards CRIRSCO (*CRIRSCO, 2019*) з метою встановлення ознак, які дозволяють визначати соціальні та екологічні ризики проєктів надрокористування.

Виклад основного матеріалу дослідження. В оцінках добувних проєктів екологічні і соціальні ризики, як і ESG загалом, часто використовуються в контексті

привабливості інвестування, хоча зацікавлені сторони включають не лише інвестиційне середовище, але й клієнтів, постачальників, персонал компаній, місцеве населення і уряди, які дедалі більше зацікавлені в безпечному (в усіх розуміннях) і стабільному розвитку організацій та компаній на їхній території. Наявність цих прямих ознак у класифікаційних системах свідчить про спрямованість стандартів оцінки до комплексної оцінки проєктів як таких, що відповідають цілям сталого розвитку.

Соціально-екологічні проблеми, які зазвичай описуються як умови "соціальної ліцензії" або "social licence to operate" (SLO), стали особливо актуальними в останні роки. У 2022 р. проблеми та ризики соціальних ліцензій особливо загострилися, що відзначають прогнози світових аудиторських компаній. У наведеній нижче табл. 1 представлено 10 найбільших бізнес-ризиків і можливостей для видобутку корисних копалин і металів. Ризики соціальних ліцензій з'явилися у списках топ-ризиків у 2015 р., але до 2022 р. вони не піднімалися вище 5-го місця.

З даними ЕУ, які опубліковані наприкінці 2022 р. (*EY, 2022*), ESG залишається головним ризиком і викликом для гірничодобувних і металургійних компаній у 2023 р. Нині це питання масштабно включено в корпоративні стратегії через його вплив майже на всі аспекти діяльності: продуктивність, логістику, економіку і фінанси, ринки збуту та ін. Деякі з найбільших сфер удосконалення ESG не є новими – забезпечення біорізноманіття, дотримання справедливості та інклюзії все ще залишаються проблемами, а закриття шахт і відновлення вимагають довгострокового, більш стратегічного планування (*EY, 2022*).

Проте з кожним роком вимоги до добувних підприємств посилюються, і на сьогодні управління водними ресурсами та біорізноманіття швидко стають невідкладними пріоритетами в умовах зміни клімату. Зацікавлені сторони очікують від компаній кращої оцінки ризиків і можливостей їх мінімізації за допомогою прозорих досліджень і гарантій щодо їхніх результатів. Більш сувора звітність стане критично важливою, якщо компанії хочуть відповідати зростаючим очікуванням зацікавлених сторін і уникати звинувачень у "зеленому відмиванні". Бонусом компаніям, які відповідають цим вимогам, стають значні конкурентні переваги – від доступу до капіталу і ресурсів до отримання ліцензії на проведення діяльності та залучення висококваліфікованого персоналу (*EY, 2022*).

Серед найзначущих для добувної промисловості в переліку соціальних і екологічних чинників були такі (в порядку зменшення): проблеми управління водними ресурсами, відповідність процесам декарбонізації виробництва, зменшення негативного впливу на зміну клімату, екологічність виробництва і обсяги викидів, які напряму або непрямо пов'язані із підприємствами та ін. (рис. 1).

Таким чином, соціальні і екологічні ризики стали базовими критеріями для реалізації проєктів надрокористування і мають знайти відображення в сучасних класифікаційних системах з оцінки запасів і ресурсів, які використовують всі зацікавлені особи для прийняття управлінських та інвестиційних рішень.

Нижче (табл. 2) наведено порівняння основних параметрів систем класифікації: CRIRSCO (за міжнародним шаблоном звітності для публічної звітності про цілі розвідки, результати розвідки, мінеральні ресурси та запаси корисних копалин (*CRIRSCO, 2019*)), PRMS Petroleum resources management system update (*Petroleum Resources Management System, 2018*), NPD Система класифікації ресурсів Норвезького нафтового директорату (*The Norwegian..., 2016*), Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр України ДСБ України (*Класифікація, 1997*).

Таблиця 1

Ранжування найбільших ризиків добувної і металургійної промисловості у 2017–2022 роках
(систематизовано за даними ЕУ (ЕУ, 2022))

№	2023	2022	2021	2019–2020	2017–2018
1	Екологічний і соціальний ризик/ Environment and social risk	Екологічний і соціальний ризик/ Environment and social risk	Ліцензування на проведення добувної діяльності/ License to operate	Ліцензування на проведення добувної діяльності/ License to operate	Цифрова ефективність/ Digital effectiveness
2	Геополітичні ризики/ Geopolitics	Декарбонізація/ Decarbonization	Високі ризики/ High Impact Risks/ Covid-19	Цифрова ефективність / Digital effectiveness	Конкурентоспроможна прибутковість акціонерів/ Competitive shareholder returns
3	Кліматичні зміни/ Climate change	Ліцензування на проведення добувної діяльності/ License to operate	Продуктивність і зростання витрат / Productivity & Rising Costs.	Максимізація прибутку / Maximizing portfolio returns	Кібератаки/Cyber
4	Ліцензування на проведення добувної діяльності/ License to operate	Геополітичні ризики/ Geopolitics	Декарбонізація/ Decarbonization Green Agenda	Кібератаки/Cyber	Новітні товари/ New world commodities
5	Продуктивність і зростання витрат/ Productivity & Rising Costs.	Капітал/Capital	Геополітичні ризики/ Geopolitics	Зростання витрат/ Rising costs	Нормативний ризик / Regulatory risk
6	Порушення поставок/ Supply chain disruption	Невизначений попит/ Uncertain demand	Капітал/Capital	Мікс енергії/Energy mix	Оптимізація готівки/ Cash optimization
7	Робоча сила/Workforce	Цифрові інновації / Digital and innovation	Робоча сила/Workforce	Робоча сила/Workforce	Соціальна ліцензія на діяльність/Social license to operate
8	Капітал/Capital	Робоча сила/ Workforce	Волатильність/Volatility	Порушення/Disruption	Заміна ресурсу/ Resource replacement
9	Цифрові інновації/ Digital and innovation	Нові бізнес-моделі/ New business models	Автоматизація цифрових даних/ Digital & Data Automation	Шахрайство/Fraud	Доступ до енергії та її оптимізація/Access to and optimization of energy
10	Нові бізнес моделі/ New business models	Продуктивність і зростання витрат/ Productivity & Rising Costs.	Інновації/Innovation	Новітні товари/ New world commodities	Управління спільними підприємствами/ Managing joint ventures

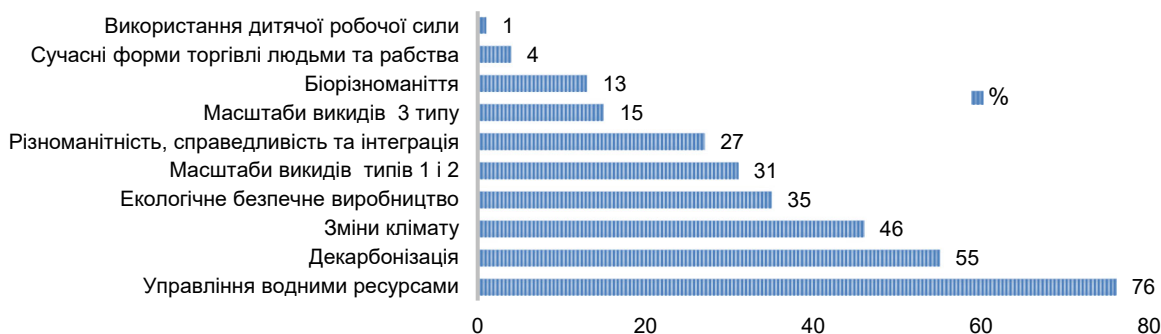


Рис. 1. Ранжування екологічних і соціальних проблем, які є базовими для добувних компаній (за даними (ЕУ, 2022)).

Тип викидів 1 охоплює прямі викиди з джерел, що належать або контролюються виробництвом;

тип 2 охоплює непрямі викиди від виробництва електроенергії, пари, опалення та охолодження, спожитої компанією;

тип 3 включає всі інші непрямі викиди, які відбуваються в ланцюжку створення продукції і доходів компанії

З наведеного зіставлення видно, що соціальна і екологічна життєздатність проєктів надр- і природокористування як базова використовується як пряма ознака лише у Рамковій класифікації ООН (UNFC). У 1997 р. UNFC була розроблена для твердих корисних копалин і традиційних енергетичних ресурсів з метою стати ідеальним інструментом для зіставлення різних стандартів оцінки. Нині цю класифікацію розширено, щоб включити інші види ресурсів. На сьогодні РКООН поширюється на енергетичні ресурси, включаючи нафту та газ; проєкти відновлювальної енергії; ресурси атомної енергії; тверді корисні копалини; проєкти зберігання/поховання CO₂; підземні води; антропогенні ресурси, такі як вторинні ресурси, перероблені із залишків і відходів виробництва. Важливою

особливістю цієї системи є систематизація інформації не тільки для геологічних і гірничодобувних підприємств, а й для всіх зацікавлених сторін. Такими сторонами визначені – міжнародні і регіональні організації у сфері міжнародних досліджень мінеральних ресурсів і енергетики (для сприяння формулюванню послідовної та далекоглядної стратегії дій), національні і місцеві уряди (для сталого управління національними ресурсами), компанії і підприємства промисловості (для розвитку виробництва і технологій, управління та фінансування проєктів), фінансові організації і фонди (для управління та фінансування проєктів) (UNFC, 2019; UNFC and Social..., 2022). Отже, саме UNFC є інструментом ефективного управління національними ресурсами, необхідними для реалізації цілей

сталого розвитку, що дає можливість всім зацікавленим особам знаходити спільне розуміння розвитку ресурсів та територій, а також робити зіставлення проєктів у різних

видах ресурсів і користування надрами. Розвиток базових ознак класифікації запасів і ресурсів в РКООН з 1997 по 2020 р. наведено в табл. 3.

Таблиця 2

Зіставлення базових ознак класифікацій запасів і ресурсів

№	Назва стандарту/документу	UNFC	CRIRSCO	PRMS	NDP	Вітчизняна класифікація
1	Основні види корисної копалини	Вуглеводні, тв. кор. копалини, вода, ядерне паливо	Тверді корисні копалини	Вуглеводні	Вуглеводні	Вуглеводні, тв. кор. копалини
2	Нетрадиційні корисні копалини, інші природні ресурси	Сонячна, вітрова, геотермальна, гідро-морська, ядерна енергії, біопаливо, зберігання CO ₂	Мінералізовані осадки, кам'яні рештки, мінералізація низького ступеня, відвали	Нетрадиційні поклади CO ₂ (2017)		Частково нетрадиційні вуглеводні
3	Об'єкт класифікації та оцінки	Проєкти (розробки та експлуатація)	Проєкти твердих корисних копалин	Проєкти (пошук, розвідка, розробка) ресурсів та запасів	Проєкти ресурсів та запасів	Ресурси та запаси надр
4	Особа, яка виконує оцінку та класифікацію	Компетентна особа	Компетентна особа, кваліфікована особа (NI 43-101)	Оцінювач (незалежні консультант, співробітник)	Оцінювач	Група експертів
Основні ознаки класифікації						
5	•	Еколого-соціально-економічна життєздатність	Ступінь геологічних знань та впевненості	Статус проєкту та шанс комерційного успіху	Класи ресурсів Об'єми вуглеводнів	Ступінь економічного, соціального та промислової значення
	•	Техніко-економічне обґрунтування	Модифікуючі фактори (гірничодобувні, переробні, металургійні, інфраструктурні, економічні, маркетингові, юридичні, екологічна, соціальні та державні)	Невизначеність	Зрілість проєкту	Ступінь геологічного та економічної вивченості
	•	Ступінь геологічних знань				Ступінь геологічних знань Складність геологічної будови як допоміжний параметр
6	Дата створення	1997	1989 (JORC), 1994 (CRIRSCO)	2007	2001	1997
7	Остання дата оновлення	2019	2012 (JORC), 2019 (CRIRSCO)	2018	2016	2018
8	Регіони використання	Глобально	США, Канада, Європа, Австралія	США, Європа	Норвегія	України
9	Залучення/Гармонізація в Україні	Частково використовується при інвестиційній оцінці проєкту	Частково використовується при інвестиційній оцінці проєкту	Частково залучений нафтогазовими компаніями	—	Гармонізовано з UNFC

Таблиця 3

Розвиток базових ознак класифікації запасів і ресурсів в РКООН

Рік	1997	2004	2009	2016	2019
Базові ознаки	Тверді корисні копалини, у т. ч. енергетичні/ Solid Fuels and Minerlas	Тверді корисні копалини, у т. ч. енергетичні/ Solid Fuels and Minerlas	Тверді корисні копалини, вуглеводневі ресурси, уран	Тверді корисні копалини, вуглеводневі ресурси, уран, відновні ресурси, геотермальні проєкти	Тверді корисні копалини, вуглеводневі ресурси, уран, геотермальні біоенергетичні проєкти та ін. відновні ресурси
	Економічна ефективність/ Economic axis	Економічна ефективність/ Economic axis	Соціально-економічна життєздатність/ Socio-economic viability	Соціально-економічна життєздатність/ Socio-economic viability	Екологічно-соціально-економічна життєздатність/ Environmental-Socio-economic viability
	Техніко-економічна обґрунтованість/ Feasibility axis	Техніко-економічна обґрунтованість/ Feasibility axis	Обґрунтованість проєкту/ Project feasibility	Обґрунтованість проєкту/ Project feasibility	Обґрунтованість проєкту/ Project feasibility
	Geological axis	Geological axis	Geological knowledge	Geological knowledge	Geological knowledge

З 2009 р. в системі соціальна життєздатність проєкту поєднується з економічними критеріями, а в 2019 р. вони доповнені екологічною складовою. Негативна реалізація соціальних або екологічних ризиків має не лише пряму дію – обмеження доступу до ресурсу, позбавлення ліцензій на ведення діяльності, але і непрямий вплив на економічні показники роботи підприємств. Соціально-екологічні чинники разом або кожний окремо мають значний вплив на економіку проєктів, що відображено в останніх класифікаційних змінах РКООН.

Інші стандарти та системи класифікації розвивалися відповідно до більш практичних і раціональних цілей забезпечення надійності оцінки для інвесторів усіх рівнів. Стандарт CRIRSCO зазначає, що видобувна галузь сьогодні є глобальним міжнародним бізнесом, фінансовий і операційний успіх якого залежить від довіри та впевненості інвесторів (CRIRSCO, 2019). На відміну від багатьох інших галузей, геологія та гірничо-промисловість мають справу з мінеральними ресурсами, які є вичерпними та невідновними. Головні акценти щодо ризиків гірничих проєктів у цих стандартах зроблені на геологічних ризиках, які залежать від достовірності інформації про об'єкти від початку геологічного вивчення до кінця видобутку. Надрокористувачам рекомендується ефективно та прозоро оцінювати ризики, пов'язані з інвестиціями, щоб забезпечити високий рівень довіри, необхідний для підтримки своєї діяльності (CRIRSCO, 2019). Критерії ESG враховуються у складі модифікуючих факторів, які визначають можливість перетворення мінеральних ресурсів у запаси, які проєктуються і мають індивідуальні технічні, технологічні, організаційні рішення для реалізації, що формує їх економічну і екологічну оцінку у відповідних правових і нормативних умовах. У стандартах оцінки вуглеводневих ресурсів 2018 соціальна і екологічна складова так само непрямим чином враховується у критеріях успішності проєкту ("шанс" на комерційну реалізацію) та параметрах невизначеності.

Висновки. Соціальні і екологічні ризики в останні роки стали базовими для реалізації проєктів надрокористування. Їх зростання може спричинити відтермінування реалізації проєктів у часі або повне скасування прийнятих рішень через те, що вони не виправдали соціальних чи екологічних очікувань, навіть за умови відповідності вимогам кількості, якості і прибутковості. Такі зміни повинні знайти відображення в сучасних класифікаційних системах з оцінки запасів і ресурсів, які використовують усі зацікавлені особи для прийняття управлінських і інвестиційних рішень. Сьогодні соціальна і екологічна життєздатність проєктів надро- і природокористування як базова використовується як пряма ознака лише в Рамковій класифікації ООН (UNFC), причому її включення відбулося в 2009 р. в частині соціальних чинників, а в 2019 р. – в частині екологічних. Це свідчить, що UNFC є інструментом ефективного управління національними ресурсами, необхідними для реалізації цілей сталого розвитку, що дає можливість усім зацікавленим особам знаходити спільне розуміння розвитку ресурсів та територій, а також робити зіставлення проєктів у різних видах ресурсів і користування надрами.

В інших міжнародних стандартах, які і у вітчизняній класифікації державного фонду надр ESG, критерій враховується непрямим чином, що є одним із ключових напрямів розвитку цих систем оцінювання мінеральних ресурсів. Такий розвиток може відбуватися у двох напрямках: 1) включення соціальних і екологічних критеріїв на пряму як базових ознак, причому це можливо як у вигляді комплексних параметрів, так і окремих

класів/підкласів; 2) використання і вдосконалення існуючих методик вартісної оцінки ресурсів і запасів із врахуванням екологічних і соціальних ризиків реалізації проєктів надрокористування.

Список використаних джерел

Баряцька, Н.В., Сафронова, Н.Г. (2020). Застосування міжнародних класифікацій запасів і ресурсів – запорука інвестиційної привабливості українських родовищ. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології та екології: наука й виробництво: Матеріали VII Міжнародного геологічного форуму, 15–20 червня 2020 р., Одеса, Україна*, 15–23.

Класифікація запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр. (1997). *Офіційний вісник України*, 19, 104. № 700/1997. Отримано з <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/432-97-%D0%BF>

Рудько, Г.І. (2017). РКООН запасів і ресурсів корисних копалин як інструмент гармонізації світових класифікацій. *Мінеральні ресурси України*, 4, 7–10. <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/article/view/223>

Рудько, Г., Курило, М., Бала, В. (2018). Критерії визначення балансової приналежності запасів вугілля за зіставленням вітчизняних класифікацій та JORC. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(80), 63–68. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.80.08>

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. 297–305.

Guidelines for Application of the Petroleum Resources Management System. (2011). https://www.spe.org/industry/docs/PRMS_Guidelines_Nov2011.pdf

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/>

Mitchel, P. (2022). Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2022. EY. https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/risks-opportunities

Petroleum Resources Management System. (2018). Society of Petroleum Engineers. 57 p. <https://www.spe.org/en/industry/reserves>

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

The Norwegian Petroleum Directorate's resource classification system. (2016). *Report No. NPD-07-16*. <https://www.norskpetroleum.no/en/petroleum-resources/resource-classification/>

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

UNFC and Social and Environmental Management. (2022). <https://unece.org/unfc-and-social-and-environmental-management-0>

References

Baryats'ka, N.V., Safronova, N.H. (2020). Zastosuvannya mizhnarodnykh klasyfikatsiy zapasiv i resursiv – zaporka investytsiynoyi pryvablyvosti ukraïns'kykh rodovysch. *Aktual'ni problemy ta perspektivy rozvytku heolohiyi ta ekolohiyi: nauka y vyrobnytstvo: Materialy VII Mizhnarodnoho heolohichnoho forumu, 15–20 June 2020, Odesa, Ukraine*, 15–23. [in Ukrainian]

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. 297–305.

Classification of reserves and resources of minerals of the state subsoil fund. (1997). *Official Bulletin of Ukraine*, 19, 104. Act. code 700/1997. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/432-97-%D0%BF> [in Ukrainian]

Guidelines for Application of the Petroleum Resources Management System. (2011). https://www.spe.org/industry/docs/PRMS_Guidelines_Nov2011.pdf

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/>

Mitchel, P. (2022). Top 10 business risks and opportunities for mining and metals in 2022. EY. https://www.ey.com/en_gl/mining-metals/risks-opportunities

Petroleum Resources Management System. (2018). Society of Petroleum Engineers. 57 p. <https://www.spe.org/en/industry/reserves>

Rudko, G.I. (2017). UNFC mineral reserves and resources as a tool for harmonizing world classifications. *Mineral resources of Ukraine*, 4, 7–10.

Retrieved from <https://mru-journal.com.ua/index.php/mru/article/view/223>. [in Ukrainian]

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. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.80.08> [in Ukrainian]

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

The Norwegian Petroleum Directorate's resource classification system. (2016). *Report No. NPD-07-16*. <https://www.norskpetsroleum.no/en/petroleum-resources/resource-classification/>

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

UNFC and Social and Environmental Management. (2022). <https://unece.org/unfc-and-social-and-environmental-management-0>

Надійшла до редколегії 18.02.23

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
e-mail: s.vyzhva@knu.ua;

M. Kurylo¹, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,
e-mail: kurilo@univ.kiev.ua;

S. Payuk², Head,
e-mail: golova@dkz.gov.ua,

Y. Tkachenko¹, PhD Student,
e-mail: july.tkch@gmail.com

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²State Commission of Ukraine on Mineral Reserves,
18/7 Henerala Almazova Str, Kyiv, 01133, Ukraine

ENVIRONMENTAL AND SOCIAL RISKS IN INTERNATIONAL AND DOMESTIC SYSTEMS OF MINERAL RESOURCE ASSESSMENT

It was defined that the ecological and social risks became key in the implementation of mining projects from the stage of geological study through development till mining operation. The main components of these risks are fixed over the past years, which are related to the problems of water resources management, the processes of decarbonization of production, the reduction of the negative impact on climate change, the environmental friendliness of production and the emissions volumes that are directly or indirectly related to mining enterprises, etc. A comparison of domestic and international standards for the assessment of mineral reserves and resources was carried out according to the basic features of classification with the determination of social and environmental assessment factors. The features of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Subsoil Fund, the UN Framework Classification, the PRMS Petroleum Resources Management System, the International Reporting Standards of the CRIRSCO Mineral Resources Committee are analyzed and compared in order to find features that allow determining the social and environmental risks of mining projects. The presence of these direct features in the classification systems indicates the orientation of the assessment standards to the comprehensive assessment of projects as such meeting the goals of sustainable development.

The social and ecological viability of subsurface and natural resource projects is used as a direct feature only in the UN Framework Classification, while its inclusion took place in 2009 in the part of social factors, and in 2019 – in the part of environmental factors. This classification is considered as a tool for the effective management of national resources, necessary for the realization of the goals of sustainable development, which enables all stakeholders to find a common understanding of the development of resources and territories, to compare projects in different types of resources and subsoil use. In other international standards, as well as in the domestic classification of the State Fund of Subsoil, socio-ecological criteria are taken into account indirectly, which is one of the key areas of development of these mineral resource assessment systems. Such development can take place in two directions: the inclusion of social and ecological criteria directly as basic features, while this is possible both in the form of complex parameters and individual classes/subclasses; use and improvement of existing methods of resource and reserves valuation, taking into account the environmental and social risks of the implementation of subsoil use projects.

Keywords: international standards, reserves assessment, environmental and social risks, features of classification, mineral resources, exploration, mining projects.

УДК 553.98:550.8

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.08>I. Bagriy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
e-mail: bagrid@ukr.netK. Starodubets, PhD (Geol.), Senior Researcher
e-mail: starodubets.kirill@ukr.netO. Malyshev, Junior Researcher
e-mail: dyku4@ua.fm
Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine,
55b O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine;V. Glon, PhD (Geol.), Senior Researcher
e-mail: vitaliyglon@gmail.com
UkrNDIGas,

20 Himnaziina Naberezhna Str., Kharkiv, 01054, Ukraine

HYDROCARBON POTENTIAL OF THE DEVONIAN SEDIMENTS OF CHERNIHIVSKO-BRAHYNKOHO PERSPECTIVE DISTRICT

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

As a result of the analysis of wells that revealed Devonian sediments, lithostratigraphic complexes were described and the geological structure and oil and gas potential of Chernihivsko-Bragynskogo perspective district of the Eastern oil and gas region of Ukraine were compared with the Pripjat depression of the Republic of Belarus.

The list of wells which gave non-industrial inflows of hydrocarbons at test is made and their main characteristics at test are described.

Hrybovorudniansko-Sednivska and Olishevsko-Losynivska fields are considered from the point of view of potential prospects for hydrocarbons from compacted carbonate reservoirs of Devonian deposits. Stock data related to the results of drilling and testing of wells №655 and №217 Hrybovo-Rudnyanska square, which confirm the prospects of Hrybovorudniansko-Sednivska area, were analyzed.

The issue of realization of the Chernihivsko-Bragynskiy perspective district as a site for signing a production sharing agreement is considered.

The geological, methodological and technological reasons of the negative results of oil and gas exploration works in the Devonian deposits of the Chernihivsko-Bragynskiy perspective district are analyzed.

Keywords: Chernihivsko-Bragynskiy perspective district, Devonian deposits, saline deposits, carbonate rocks, hydrocarbons.

Problem statement. In the Dnieper-Donetsk oil and gas region (DDOGR) there are 15 oil and gas areas with different levels of explored reserves, promising resources, exploration and development of subsoil. The least researched area is the Chernihivsko-Brahynskiy Perspective District (CBPD) located on the north-western part of the DDOGR. According to the density of unexplored hydrocarbon resources, most of the district belongs to VIII–VII categories (less than 5 thousand tons of hydrocarbons per 1 km², partly – Yadutivsko-Kinashivska zone – up to 10 thousand tons per 1 km²). The depth of the basement in the district varies from 1000 m to 6000 m. The total area of the district is 8200 km², on 1.01.2021, the industrial productivity of any set of deposits in the CBPD has not been proven, and the prospects of the area remain uncertain.

Recent publications review. Despite the large area of CBPD, potential prospects and about 150 deep wells that have discovered Devonian sediments (*Pryharina, 2007*) – studies of the area were actually in the early 90's for a number of economic reasons, and publications of the last 30 years, as a consequence, are retrospective (*Strizhak and Korzhnev, 2012*) or consider methodologically theoretical aspects of the negative result of exploration of hydrocarbons (explosives) in Devonian sediments (*Lebid, 2015*). The main works covering the north-western part of DDOGR and carried out in recent years are analytical reports on the review and generalization of geological and geophysical materials performed by SE "UKRGEOFIZYKA" (*Beztesnyi et al., 2008; Baranova and Voitsytskyi, 2018*), also detailed the results of lithological-stratigraphic, facial, structural-tectonic, petrophysical, geochemical and geological-industrial studies in carbonate sediments of the Devonian complex within different structural-facial zones of DDOGR (*Vakarchuk, 2016*).

Highlighting previously unselected parts of the overall problem. During the more than 60-year history of studying the oil and gas potential of Devonian CBPD

sediments, three main parts of the general problem were formed – industrial oil and gas issues, namely: 1) geological, 2) methodological, 3) technological, each with its unresolved issues. However, the issue of the economic perspective of the CBPD has not been identified yet and there are no strategies for an economic approach to one of the biggest white spots of the DDOGR.

Article aims. The aims of the article are to consider lithostratigraphic complexes of Devonian sediments, analyze the results of tests of CBPD wells and identify those that gave inflows, consider the potential of hydrocarbon CBPD in terms of licensing and economic prospects for development.

Main research material. Interest in the study of Devonian sediments in DDOGR is clearly recurrent – interest is growing with the depletion of upper structural floor resources, and each new discovery related to the main Lower Devonian oil and gas complex sharply reduces this interest.

The most intensive development of Devonian exploration work was observed in the second half of the 60's and early 70's (*Strizhak and Korzhnev, 2012*), when seismic surveys covered almost the entire north-western part of DDOGR, where their depths do not exceed 4–5 km. The discovery of industrial oil deposits in subsalt and intersalt Devonian sediments within the neighboring Pripjat Basin (Belarus), as well as the discovery of a number of deposits in the middle part of the DDOGR showed that in the Dnieper-Donetsk basin Devonian sediments are worse than in all Pripjat depression. In the Dnieper-Donetsk basin there are slightly different conditions of oil and gas, although the regions have many similar features of the structure and history of formation, namely:

- belonging of both to oil and gas objects of continental reefs according to geodynamic classification;
- satisfactory spatial and stratigraphic correlation of Devonian sediments, the presence of five lithological complexes;

- a similar history of the development of adjacent parts of the regions – the Pripjat depression and the north-western part of DDOGR;

- oil and gas properties of Devonian sediments.

87 oil fields have been discovered in the Pripjat basin on the territory of the Republic of Belarus (*according to the official website of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus*) (Fig. 1).

Their search began in 1952, and development in 1965. 250 oil deposits were discovered in these fields, 247 of them in Devonian sediments and 3 in Upper Proterozoic sediments. The largest number of oil deposits (130) is confined to the subsalt carbonate complex; in the intersalt complex – 81, in the upper salt complex – 20, in the subsalt terrigenous complex – 16. Oil production in 2020 amounted to 1.7 million tons of oil.

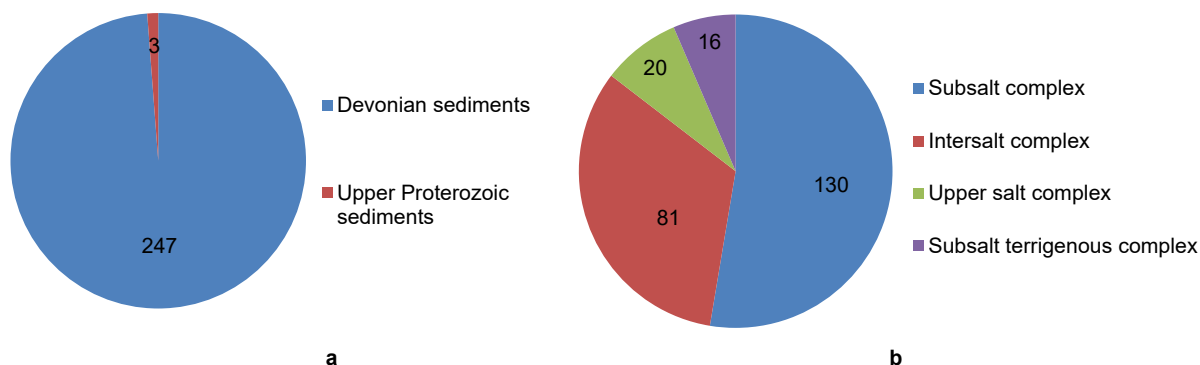


Fig. 1. Stratigraphic (a) and Lithostratigraphic (b) distribution of oil deposits in the Pripjat basin

Devonian sediments in the north-western part of the DDOGR as well as in the Pripjat depression are represented stratigraphically by a single stratum of the Middle Devonian and Upper Devonian ages and are divided into five lithologic stratigraphic complexes according to lithological features: subsalt, lower salt, intersalt, upper salt and supersalt.

Stratigraphically, the **Subsalt complex** is represented by the Alaty and Voronezh horizons of the Frasnian age, which lie directly on the bedrock. Sediments of the Alaty horizon are represented by the thickness of effusive rocks of different composition. Above the section there are small carbonate-clay rocks (marls, limestones, dolomites) of the Voronezh horizon. The subsalt part of the Yevlan horizon is composed of argillites alternating with sulphate-carbonate rocks. Volcanic formations (tufolavas, tufaleurolites, tuff sandstones, tuffs), which may occupy different stratigraphic levels and have different thicknesses, also take part in the section of subsalt Devonian. The **Lower Salt complex**, which corresponds to the salt formations of the Eulanov-Livno horizon of the Frasnian age, lies below the salt complex. There are cases of Voronezh age of the lower salt. Lithological composition – rock salt with layers of dolomite, anhydrite, clay limestone and marl. Salt sediments are sometimes replaced by sulfate-carbonate with layers of clayey, often saline rocks, siltstones and sandstones. The **Intersalt complex** is represented by the Zadonsk-Yelets horizon, from which the sedimentary accumulation of the Famennian age begins. In the intersalt complex there is a lower clay-carbonate stratum (Zadonsk horizon) and an upper terrigenous stratum (Yelets horizon). The clay-carbonate stratum of the Zadonsk horizon in the study area is practically absent, sometimes standing out in small thicknesses. The terrigenous stratum of the intersalt complex is represented by a fine-rhythmic layering of clayey sandstones, argillites, siltstones with layers of limestone. The **Upper Salt Complex** corresponds to the Yelets-Lebedyan horizon of the Famennian age, composed of salt deposits or their salt-free analogues, which may include sulfate formations, carbonates of various modifications, including limestones, dolomitized limestones, Merbofite-Dolomite. **Supersalt complex**, Dankiv-Lebedyan horizon of the Famennian tier, composed of effusive-terrigenous and

effusive rocks (*Beztelesnyi et al., 2008; Baranova and Voitsytskiy, 2018; Kochev, 1970; Khmel et al., 1969*).

Reflecting on the negative effects of exploratory drilling on Devonian sediments, analyzing previous forecasts, Yu.O. Arsirii, B.P. Kabyshev and others tried to compare and contrast the Devonian intersalt and subsalt sediments of the northwestern part of the DDOGR to the Pripjat depression. As a result of their work, they came to the conclusion that the conditions of oil and gas formation and oil and gas accumulation in the Pripjat depression are unequal, so the prospects for the north-west of DDOGR are clearly worse. However, the authors insist that this is not evidence of the futility of this segment in DDNGO. The authors consider intersalt Famennian deposits to be promising; less significant, in their opinion, are the Frasnian saline deposits. In structural terms, preference is given to the peripheral areas of large depressive structures (Malodivyska, Borznyiaska, Viktorivska, Velykozagorivska, Burivska squares), the slopes of the basement (Northern Khreshchatytska, Pishkivska), the axial part of the DDOGR (Nizhynska). Instead, the vaulted parts of the highly elevated protrusions of the basement, composed of effusive-terrigenous deposits, are considered unpromising (*Arsirii et al., 1981*).

Confirmation of these considerations was obtained in the year of publication of the article (*Arsirii et al., 1981*) during the testing of the Ladutivska structure in the Ladutivska well 1.

In total, according to the results of 60 years of study and drilling of about 150 deep drilling wells, the most significant oil manifestations and non-industrial oil inflows within the CBPD were recorded in terrigenous deposits of intersalt Devonian (Table 1) in wells Kinashivska 3, 1, Hrybovorudnianska 1, Ladutivska 1 (*Beztelesnyi et al., 2008; Baranova and Voitsytskiy, 2018*).

However, the availability of promising data for only 4 tested wells, of which 3 are located on the border with Monastyrshche-Sofiyivskyi oil-bearing area, for more than 60 years of CBPD drilling is not evidence of the futility of further study and testing of Devonian deposits. For example, a detailed analysis of stock materials (*Kochev, 1970; Khmel et al., 1969*) concerning the results of drilling and testing of well № 217 and structural exploration well № 655 on Hrybovo-Rudnyanska square shows a number of indirect

(production – 24.6 billion m³). Geological resources of unconventional oil – 1144.0 million tons (extractive – 85.9 million tons) (Vakarchuk, 2016).

The second promising area for the search for unconventional oil and unconventional gas (Vakarchuk, 2016), which is partly within the CBPD, is Olishevsko-Losynivska. The average depth of promising strata within the site is 3800 m. The area of the site is 560 km². Geological resources of unconventional gas of compacted carbonate rocks of the Olishevsko-Losynivska section are estimated at 94.3 billion m³ (extractive 33 billion m³), geological resources of unconventional oil – 224 million tons (extractive – 16.8 million tons).

From the point of view of economic prospects, CBPD remains unattractive to investors, primarily due to the lack of precedent for establishing the viability of any Devonian complex.

At the end of 2020 and the beginning of 2021, 8 production sharing agreements (PSA) were signed in Ukraine, of which 7 agreements relate to the Eastern Oil and Gas Region of Ukraine and 1 agreement to the Western Oil and Gas Region of Ukraine. All areas of the PSA cover areas well studied by drilling and seismic research, within which the winning companies will study and develop traditional for Ukraine reservoirs and look for low-amplitude hydrocarbon traps that have not been discovered or missed by previous studies in contrast to CBPD which remains one of the largest white spots of DDOGR.

The total area of the CBPD is 8,200 km², of which only three plots are covered by licenses (Fig. 3). The field of the Slavutych scientific landfill with the area of 496.19 km², the field of the Yadutivsko-Borznyanskyi scientific landfill with the

area of 471.82 km² and the Prachivska field with the area of 24.8 km². Thus, more than 7,000 km² of unlicensed area remains. Since there are no significant promising facilities that will be of interest to potential investors on the territory of the CBPD, and thematic studies conducted for the state budget and aimed at generalizing or reinterpreting existing data do not open new fields, the only option is to prepare the site for implementation under a product sharing agreement. If the work is successful, the state will be able to receive additional taxes to the budget and improve the socio-economic situation of the research area.

Conclusions. Analyzing the reasons for the negative results of exploration for oil and gas in the Devonian deposits of the CBPD, they can be divided into three groups that are closely related: 1) geological, 2) methodological, 3) technological.

Geological reasons include the complex geological structure of Devonian sediments, which include, along with the development of terrigenous and carbonate sediments, widespread volcanics (vein, outflow, pyroclastic), salt tectonogenesis and significant tectonic disturbance of both subsalt and intersalt sediments. In such conditions the lithological-stratigraphic correlation becomes very complicated and the reliability of geophysical research decreases. The intensification of tectonic processes associated with Devonian salt after the formation of intersalt and supersalt Devonian sediments led to the fact that the best reservoir varieties of these strata were not always associated with the apical parts of anticline structures, with mainly exploratory and parametric wells.

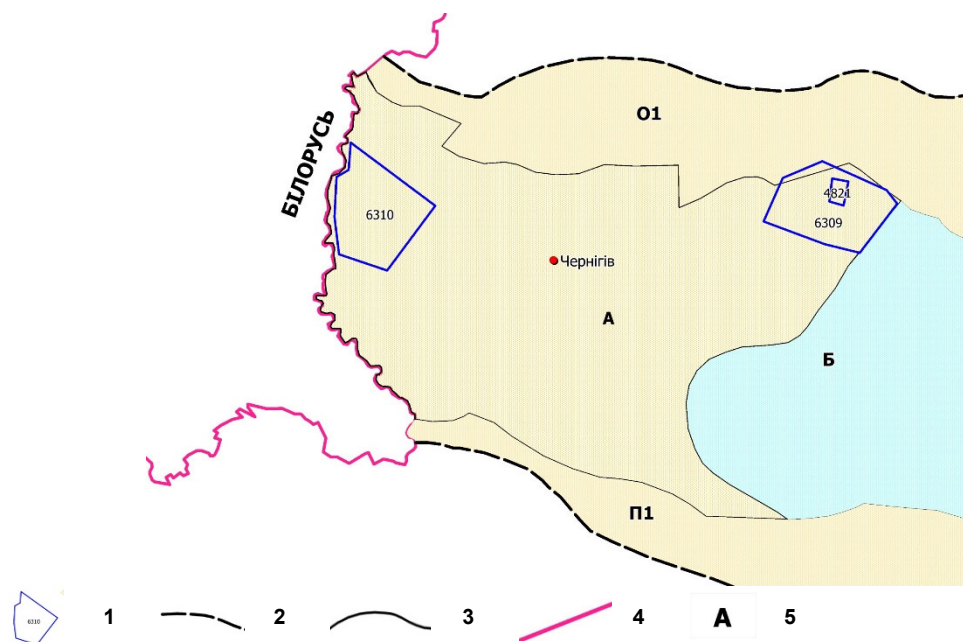


Fig. 3. Layout of special subsoil use permits on the territory of Chernihivsko-Brahynskyi Perspective District:

1 – contour of special permits; 2 – borders of the Dnieper-Donetsk oil and gas region; 3 – boundaries of oil and gas areas; 4 – the state border of Ukraine; 5 – index of oil and gas region (A – Chernihivsko-Brahynskyi promising area, Б – Monastyrshche-Sofiiv oil-bearing area, O1 – oil and gas area of the North side, П1 – perspective area of the South side)

The second (methodological) reason for the negative results is the methodologically incorrect approach to drilling in the mid-60s of the last century on Devonian deposits. After the discovery of oil fields in the Pripyat depression, the study of this complex in the northwest of the DDOGR was carried out based on the analogy of the geological structure of these regions. However, this thesis was not confirmed in

many aspects in the future. Next exploration and discovery of a number of hydrocarbon deposits in the DDOGR have shown that there are other conditions for the formation of hydrocarbon deposits in the Pripyat depression.

Technological reasons include the imperfect technology of discovery during drilling and testing of promising objects. This technology requires a radical change in the direction of

opening the layers on the facilitated washing liquids, causing the inflow by a gradual change of depressions and the development of effective methods of intensification of the inflow through fracturing. One of the potential opportunities for successful completion of wells is the completion of a horizontal well.

CBPD is the least studied oil and gas area of DDOGR, in which the industrial productivity of any set of deposits has not been proven, the prospects of the area remain uncertain and geological exploration work is minimized. At the same time, the CBPD, having a fairly large area, remains one of the most interesting areas from a geological point of view for further exploration and exploration for hydrocarbons in the near future.

In order to achieve new results on the territory of the CBPD, it is proposed to prepare it as a site for implementation within the PSA.

References

- Arsirii, Yu.O., Kabyshev, B.P., Lebid, V.P. et al. (1981). Mathematical modeling of new industrial accumulations of hydrocarbons in the Dnieper-Donetsk basin. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 3–5. [in Ukrainian]
- Baranova, N.M., Voitsytskiy, Z.Ya. (2018). Operational analysis of geological and geophysical materials in the north-western part of the DDZ. *Report of the Technological Center of the State Enterprise "Ukrgeofizika"*. Kyiv, 515 p. [in Ukrainian]
- Beztesnyi, S.A., Martyniuk, L.V., Slobodian, N.L. et al. (2008). Exploratory seismic surveys of the CDPM on Yadutivsko-Kinashivska square in the north-western part of the DDZ. *Report of the Technological Center of the State Enterprise "Ukrgeofizika" on the topic U-06-177 / 6*. Kyiv, 77 p. [in Ukrainian]
- Khmel, F.F., Korkodas, E.Y., Myroshnykova, A.D., Feshchenko, N.M. (1969). Processing and generalization of the results of parametric and support drilling in the territory of the Chernigovneftegazrazvedka trust. *Gribovorudnyanskaya reference well No. 217. Book 1. Trust "Chernigovneftegazrazvedka", Complex thematic party. Chernigov*, 92 p. [in Russian]
- Khmel, F.F., Korkodas, E.Y., Myroshnykova, A.D., Feshchenko, N.M. (1969). Processing and generalization of the results of parametric and support drilling in the territory of the Chernigovneftegazrazvedka trust. *Gribovorudnyanskaya reference well No. 217. Book 2. Trust "Chernigovneftegazrazvedka", Complex thematic party. Chernigov*, 97 p. [in Russian]
- Kochev, P.D. (1970). Geological report on the results of drilling a structural exploration well No. 655 in the Gribovo-Rudnyanskaya area for 1969–1970. *Book 1. Trust "Chernigovneftegazrazvedka", Nizhyn oil and gas exploration expedition of deep drilling. Nizhyn*, 92 p. [in Russian]
- Lebid, V.P. (2015). Search features lower petroleum hydrocarbons in the complex for different subregions Dnieper-Donetsk sliding. *Mineral Resources of Ukraine*, 2, 22–29. [in Ukrainian]
- Pryharina, T.M. (2007). Geological and economic assessment of hydrocarbon resources of the Eastern, Western and Southern oil and gas

regions of Ukraine as of 01.01.2004 and determination of the scope and directions of exploration work. *Book 4. Chernihiv*. [in Ukrainian]

Strizhak, V.P., Korzhnev, P.M. (2012). Features of structure and oil and gas potential of Devonian deposits of the north-western part of the Dnieper-Donetsk avlagon. *Tectonics and Stratigraphy*, 39, 43–56. [in Ukrainian]

Vakarchuk, S.H. (2016). Estimation of oil and gas potential of compacted rocks of the Devonian complex of the Dnieper-Donetsk basin. *Oil and gas industry of Ukraine*, 1, 14–18. [in Ukrainian]

Website of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus. (n.d.). <https://minpriroda.gov.by/ru/minsyrbaza-ru/>

Список використаних джерел

Арсирій, Ю.О., Кабишев, Б.П., Лебідь, В.П. та ін. (1981). Математичне моделювання нових промислових зкупчень вуглеводнів у Дніпровсько-Донецькій западині. *Доп. АН УРСР*, 3–5.

Вакарчук, С.Г. (2016). Оцінка нафтогазового потенціалу ущільнених порід девонського комплексу Дніпровсько-Донецької западини. *Нафтогазова галузь України*, 1, 14–18.

Лебідь, В.П. (2015). Особливості пошуку вуглеводнів у нижньому нафтогазоносному комплексі для різних субрегіонів Дніпровсько-Донецького розсуду. *Мінеральні ресурси України*, 2, 22–29.

Стрижак, В.П., Коржнев, П.М. (2012). Особливості будови та нафтогазоносності девонських відкладів північно-західної частини Дніпровсько-Донецького авлакогену. *Тектоніка і стратиграфія*, 39, 43–56.

Безтесний, С.А., Мартинюк, Л.В., Слободян, Н.Л. та ін. (2008). Пошукові сейсморозвідувальні роботи МСГГ на Ядутівсько-Кінашівській площі у північно-західній частині ДДЗ. *Звіт Технологічного центру ДГП "Укргеофізика" за темою У-06-177/6*. Київ, 77 с.

Баранова, Н.М., Войцицький, З.Я. (2018). Оперативний аналіз геолого-геофізичних матеріалів у північно-західній частині ДДЗ. *Звіт Технологічного центру ДГП "Укргеофізика"*. Київ, 515 с.

Кочев, П.Д. (1970). Геологический отчет о результатах бурения структурно-поисковой скважины № 655 на Грибово-Руднянской площади за 1969–1970 гг. Кн. 1. Трест "Черниговнефтегазразведка", Нежинская нефтегазразведочная экспедиция глубокого бурения. Нежин, 92 с.

Хмель, Ф.Ф., Коркодас, Э.И., Мирошникова, А.Д., Фещенко, Н.М. (1969). Обработка и обобщение результатов параметрического и опорного бурения не территории деятельности треста "Черниговнефтегазразведка". Грибово-руднянская опорная скважина № 217. Кн. 1. Трест "Черниговнефтегазразведка", Комплексная тематическая партия. Чернигов, 92 с.

Хмель, Ф.Ф., Коркодас, Э.И., Мирошникова, А.Д., Фещенко, Н.М. (1969). Обработка и обобщение результатов параметрического и опорного бурения не территории деятельности треста "Черниговнефтегазразведка". Грибово-руднянская опорная скважина № 217. Кн. 2. Трест "Черниговнефтегазразведка", Комплексная тематическая партия. Чернигов, 97 с.

Пригарина, Т.М. (2007) Геолого-економічна оцінка ресурсів вуглеводнів Східного, Західного і Південного нафтогазоносних регіонів України станом на 01.01.2004 р. та визначення обсягів і напрямів геологорозвідувальних робіт. Кн. 4. Чернівці.

Сайт Міністерства природних ресурсів і охорони навколишнього середовища Республіки Білорусь. (н.д.). <https://minpriroda.gov.by/ru/minsyrbaza-ru/>

Надійшла до редколегії 07.11.22

І. Багрій, д-р геол. наук, проф.

e-mail: bagrid@ukr.net

К. Стародубець, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.

e-mail: starodubets.kirill@ukr.net

О. Малишев, мол. наук. співроб.

e-mail: dyku4@ua.fm

Інститут геологічних наук НАН України,

вул. О. Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна;

В. Глонь, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

e-mail: vitaliygion@gmail.com;

Філія "УкрНДІгаз" АТ "Укргазвидобування",

вул. Гімназійна Набережна, 20, м. Харків, 61010, Україна

ВУГЛЕВОДНЕВИЙ ПОТЕНЦІАЛ ДЕВОНСЬКИХ ВІДКЛАДІВ ЧЕРНІГІВСЬКО-БРАГІНСЬКОГО ПЕРСПЕКТИВНОГО РАЙОНУ

У результаті проведеного аналізу по свердловинах, що розкрили відклади девону, було проведено опис літостратиграфічних комплексів та виконано порівняння геологічної будови та нафтогазоносності Чернігівсько-Брагинського перспективного району Східного нафтогазоносного регіону України з Прип'ятським прогином Республіки Білорусь.

Складено список свердловин, які дали непромислові припливи вуглеводнів під час випробування та описано їхні основні характеристики. Розглянуто Грибоворуднянсько-Седнівська та Олішівсько-Лосинівська ділянки з погляду потенційних перспектив на вуглеводні з ущільнених карбонатних колекторів відкладів девону. Проаналізовано фондові дані, що стосуються результатів буріння та випробування по свердловинах № 655 та № 217 Грибово-Руднянської площі, що підтверджують перспективи Грибоворуднянсько-Седнівської ділянки.

Піднято питання реалізації Чернігівсько-Брагинського перспективного району як ділянки для підписання угоди про розподіл продукції. Проаналізовано геологічні, методичні та технологічні причини негативних результатів геологорозвідувальних робіт на нафту і газ у девонських відкладах Чернігівсько-Брагинського перспективного району.

Ключові слова: Чернігівсько-Брагинський перспективний район, девонські відклади, підсольові відклади, карбонатні породи, вуглеводні.

УДК 553.94: 551.735(477.83)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.09>І. Бучинська, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: ibuchynska@ukr.netМ. Матрофайло, канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: mmatrofaylo@gmail.comА. Побережський, канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: igggk@mail.lviv.uaІнститут геології і геохімії горючих копалин НАН України,
вул. Наукова, 3-а, м. Львів, 79060, Україна**КОМПЛЕКСНЕ ОСВОЄННЯ СУПУТНИХ КОРИСНИХ КОПАЛИН І КОМПОНЕНТІВ ВУГІЛЛЯ
ЛЮБЕЛЬСЬКОГО РОДОВИЩА ЛЬВІВСЬКО-ВОЛИНСЬКОГО БАСЕЙНУ***(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, доц. С.Є. Шнюковим)*

На прикладі Любельського родовища Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну розглянуто можливості комплексного освоєння вугільних родовищ із перспективами видобутку супутніх корисних копалин і компонентів вугілля. Любельське родовище має значні запаси високоякісного вугілля, яке може бути використане для коксування, що буде значним внеском у розвиток енергетичної бази України. На Любельському родовищі поширене вугілля марок Ж, КЖ і К. Коксівне вугілля становить майже половину запасів родовища. Загальні розвідані запаси вугілля – 522884 тис. т. Значна дегазація вугленосної товщі сукупно з високими технологічними якостями вугілля є причиною підвищеного інтересу до Любельського родовища. У південній його частині на полях шахт Любельська № 1 і 2, у межах глибин залягання основних робочих пластів, газ майже відсутній. Але вугільні пласти v_6 , p_0^6 , p_7 , p_7^1 , p_7^9 , p_8 , p_9 залягають у метановій газовій зоні на полях шахт Любельські № 1–4 та характеризуються високою природною газоносністю – від 9,60 до 30,70 м³/т с.б.м. Метанова газова зона занурюється в бік донної частини Карівської синкліналі. Під час проєктування вуглевидобутку на глибоких горизонтах Любельського родовища необхідно брати до уваги їхню газоносність і враховувати можливість дегазації вугільних пластів. Вугільний газ може розглядатися як самостійна копалина, видобування якої можливе в достатніх об'ємах та економічно доцільне. Вугілля Любельського родовища може також бути придатним як сировина для видобутку германію. Так, підраховані запаси германію за фактичним вмістом в енергетичному вугіллі ділянки Любельська № 3 за категорією С₂ становили 248,41 т. За окремими пробами концентрації галію, ванадію і кобальту досягають рівня умовно промислових, але не можуть використовуватися. Проєктуючи економічно вигідні технологічні схеми вуглевидобутку, потрібно враховувати весь комплекс показників щодо освоєння супутніх корисних копалин і компонентів вугілля.

Ключові слова: запаси вугілля, газоносність, германієносність, комплексне використання, Любельське родовище, Львівсько-Волинський басейн.

Постановка проблеми. Шляхи вдосконалення вугільної галузі західного регіону України і, зокрема, Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну (ЛВБ) ґрунтуються на економічно виправданому збереженні наявного виробничого потенціалу вугільної галузі за умов його оновлення й підвищення ефективності функціонування (Павлюк та ін., 2015). У балансі енергобезпеки України вугілля є перспективною складовою. Ця тенденція в майбутньому не можлива без переходу вугільної промисловості до ринкової економіки, що дозволить вивести роботу вугільних підприємств на новий рівень (Vivcharenko, 2014).

Комплексне використання продуктів переробки вугілля – сучасний принцип, якого дотримуються у вугільній галузі під час видобування, первинної і вторинної переробки вугілля та вуглевмісних продуктів. Із цієї задачі випливає актуальність комплексного раціонального освоєння вугільних родовищ та супутніх корисних копалин. Такий підхід застосовують у Китаї, який посідає перше місце у світі з видобутку вугілля. Супутнє вилучення германію – один зі способів поліпшення економічних показників вугільної галузі. Найважливішим джерелом германію є германієносні вугільні родовища, які розробляються близько Lincang, провінція Юньнань і Xilinhaote, провінція Внутрішня Монголія.

У світі ведуться роботи з використання метану в процесі видобутку вугілля в шахтах. Шахтні методи дегазації широко застосовують у Німеччині (ресурси 3–4 трлн м³), Великій Британії (1,9–2,8 трлн м³), Австралії (6,0 трлн м³) та інших країнах. У Польщі (ресурси 1,6–2,0 трлн м³), Чехії (1,1–1,5 трлн м³), КНР (25–30 трлн м³).

Важливо вже на стадії розвідувальних робіт на вугілля як основного виду сировини проводити вивчення його супутніх корисних копалин і компонентів. Матеріали

геолого-економічних оцінок родовищ вугілля, які подаються на експертизу ДКЗ України, повинні містити обґрунтування повного комплексного і економічно доцільного вилучення з надр запасів основних і супутніх корисних копалин, а також наявних у них цінних компонентів, на основі використання існуючих прогресивних технологій видобутку і переробки мінеральної сировини за умови дотримання вимог охорони надр і навколишнього природного середовища (довкілля) (Про затвердження..., 1997).

У процесі модернізації збережених діючих шахт і проєктування нових потрібно максимально використовувати потенціал вугленосної товщі, що сприятиме оптимізації структури виробництва і забезпеченню багатовекторного використання надр. Доцільність такого підходу ми проаналізували на прикладі Любельського родовища Південно-Західного вугленосного району Львівсько-Волинського басейну.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Львівсько-Волинський кам'яновугільний басейн посідає важливе місце в економіці України. Через складні економічні умови та російсько-українську війну відчувається дефіцит вугілля, яке згідно з Національною енергетичною програмою України залишається одним з головних енергоносіїв. Відновити вуглевидобуток можна різними шляхами. Один з потенційно можливих напрямків – будівництво нових шахт, яке неможливе без оцінки ресурсів вугілля, вичерпного аналізу окремих вугільних пластів родовищ вугільного басейну. Нарощування мінерально-сировинної бази ЛВБ відбуватиметься за рахунок освоєння нових площ та глибоких горизонтів. Потенціал вугільних родовищ на сьогодні визначається не лише встановленням вугленосності, але й низки критеріїв, що визначаються комплексним вилученням супутніх корисних копалин і компонентів вугілля (Бучинська, 2021).

Одним з основних резервів поповнення видобувного шахтного фонду ЛВБ є Любельське родовище Південно-Західного вугленосного району (рис. 1). Воно розташоване в південно-західній частині Львівсько-Волинського басейну в межах Карівської синкліналі. Площа родовища 170 км², за максимальної довжини з північного заходу на південний схід 34 км і ширини 5 км. Карівська синкліналь – це лінійна складка північно-західного загальнокарпатського простягання з пологим (1–2°) зануренням на південний захід. Із південного заходу структура обмежена Нестерівським, а з північного сходу – Бутин-Хлівчанським антиклінальними підняттями, ускладненими зонами насувів.

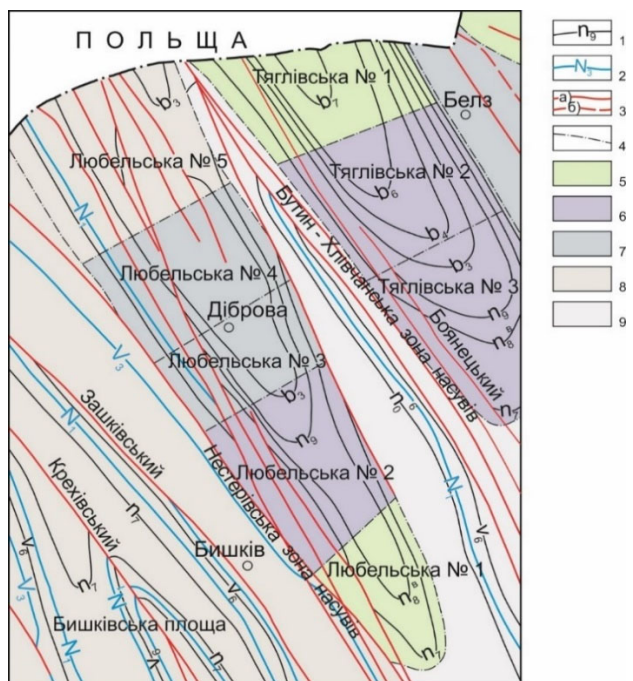


Рис. 1. Оглядова карта Південно-Західного вугленосного району Львівсько-Волинського басейну (за матеріалами ДГП "Західукргеологія", 2002).

Умовні позначення: 1 – вугільні пласти та їхні індекси;

2 – пласти вапняків та їхні індекси;

3 – розривні тектонічні порушення (а – достовірні, б – передбачувані); 4 – границі шахтних полів, площі і ділянок; 5 – резервні ділянки групи "а"; 6 – розвідувальні ділянки для шахт; 7 – перспективні для розвідки ділянки для шахт; 8 – перспективні площі з прогнозними ресурсами; 9 – площі поширення кам'яновугільних відкладів з непромисловою вугленосністю

Складка асиметрична, з кутами падіння на крилах 3–10°, з краще збереженим північно-східним крилом і ерозійно зрізаним південно-західним (за даними Львівська ГРЕ ДГП "Західукргеологія", 1993). Північно-східне крило складки має кути падіння 3–8°, південно-західне у північній частині – 8–10°, а у південній – 0–2°. Розмах крил до 10 км. Структура розділяється поздовжнім антиклінальним підняттям на дві синклінальні складки II порядку. В її межах виділяється низка поздовжніх і поперечних диз'юнктивних порушень скидо-насувного типу (скиди № 1–3, насуви № 1 і 2), які розчленовують пологую складку на окремі блоки. Названі вище зони насувів, що ускладнюють Нестерівське і Бутин-Хлівчанське антиклінальне підняття, супроводжуються каскадом з 10–14 паралельних насувів з кутами падіння змішувачів 10–80° і азимутами падіння 220–240°. Сумарна амплітуда насувів досягає 400 м. У цілому тектонічна порушеність родовища збільшується в південному напрямку, а

максимальні амплітуди диз'юнктивів характерні для північної частини структури. Карівська синкліналь ускладнена також поперечним крутопадаючим (80–85°) Куличківським скидом з амплітудою 15–25 м і північно-східним простяганням.

Любельське родовище – найбільш занурена частина ЛВБ з максимально повним стратиграфічним розрізом, що складений девонськими, кам'яновугільними, юрськими, крейдяними і четвертинними відкладами. Девонські утворення представлені кавернозними вапняками і червоно-бурими вапняками франського і фаменського ярусів. Вище зі стратиграфічною незгідністю залягають відклади нижнього і середнього карбону, які належать до турнейського, візейського, серпуховського і башкирського ярусів. Верхня частина серпуховського і нижня частина башкирського ярусів є найпродуктивнішими на кам'яне вугілля на Любельському родовищі і в басейні в цілому.

Техніко-економічними розрахунками, проведеними інститутом "Укрніпроєкт" доведено економічну доцільність промислового освоєння родовища п'ятьма шахтами (Любельська № 1, 2, 3, 4, 5) за загальної потужності 6,3 млн т вугілля на рік. Станом на 01.01.1994 р. у межах шахти Любельська № 1 закінчено детальну розвідку, запаси вугілля узгоджені ДКЗ України в грудні 1993 р. (протокол № 168 від 23.12.93 р.) і зазначене родовище передано Мінвуглепрому для промислового освоєння. На полі шахти Любельська № 2 завершена попередня стадія, і на тепер проводиться детальна розвідка. На інших полях шахт (Любельська № 3, 4, 5) закінчені оціночно-пошукові роботи (Костик та ін., 2020).

Львівська ГРЕ ДГП "Західукргеологія" проводила багаторічні дослідження по площі Любельського родовища, результати яких наведено в численних звітах. Геолого-економічну оцінку запасів кам'яного вугілля Любельського родовища виконувало ДП "Сі-Сі-Ай-Любеля". Планується, що майбутня шахта Любельська № 1–2 на блоці № 1 матиме два робочі пласти середньої потужності 1,51 і 1,63 м та три пласти на блоці № 2 середньої потужності від 1,0 м до 1,3 м. Вони залягають на глибині 700–850 м. Розкриття шахтного поля буде здійснено двома вертикальними стволами, розташованими в середині блоку № 1. Глибина головного ствола становитиме 945 м, допоміжного – 979 м. Підвищення ефективності вуглевидобутку передбачає розширити межі поля шахти "Любельська" № 1–2 за рахунок суміжної ділянки Любельська № 3, на якій попередньо підраховано додаткові ресурси в розмірі 129 млн т. Дослідження газонасиченості, викиднебезпечності, ударнебезпечності вугілля і порід проводить ДП "Сі-Сі-Ай-Любеля". Мінімальна глибина залягання продуктивних кам'яновугільних відкладів на родовищі 657,1 м, максимальна – 1517,8 м.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Переважно вугільні поклади розглядаються як потенційний резерв лише вугільної сировини. На Любельському родовищі розвідано значні запаси вугілля, що дозволить у разі відповідного державного фінансування значно збільшити видобуток твердого палива, у тому числі й дефіцитного коксівного. Одночасно вугленосна товща родовища є газонасною і германісною, а комплексне освоєння може забезпечити підвищення ефективності та рентабельності вуглевидобутку.

Для об'єктивної геолого-економічної оцінки можливої попутного вилучення германію з вугілля необхідно мати відомості щодо розподілу та концентрації цього елементу у вугіллі. Супутній газ-метан може розглядатися як нетрадиційне джерело вуглеводневих газів. А попередня дегазація вугленосної товщі сприятиме запобіганню аварійним ситуаціям.

Комплексне використання сировинної бази із застосуванням певних технологій сприяло б підвищенню рентабельності вуглевидобувного комплексу з потенційним переходом на багатопродуктове виробництво.

Мета та об'єкт роботи – встановлення підходів до комплексного використання вугільних покладів. На прикладі Любельського родовища ЛВБ ми розглянули газоносність і германієносність вугленосної товщі як показники, що необхідно враховувати під час проєктування економічно вигідних технологічних схем вуглевидобутку.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вугленосність родовища. Основні промислові запаси і прогнозні ресурси вугілля Любельського родовища сконцентровані у 12 вугільних пластах, більшість з яких має середню потужність від 0,73 до 1,5 м, а пласти π_7^a , π_7^h і π_7 – 1,50–1,60 м у південній частині родовища (поле шахти Любельська № 1). Глибина залягання продуктивних відкладів на родовищі – 657,1 м, максимальна – 1517,8 м.

На Любельському родовищі поширене вугілля марок Ж, КЖ і К. Коксівне вугілля становить майже половину запасів родовища. За величиною зольності вугілля середньозольне, зольне, і багатозольне. За показниками вмісту масової частки сірки переважають групи багатосірчастого вугілля (39,7 %) і малосірчастого (29,0 %). Переважна більшість запасів вугілля на родовищі залягає на глибині 600–900 м. Прогнозні ресурси вугілля пов'язані з вугільним пластом ν_6 , який розташований на глибині понад 900 м. Загальні розвідані запаси вугілля сягають 522884 тис. т, у тому числі: балансові запаси 467147 тис. т за категоріями В+С₁+С₂ або 89,3 %, забалансові – 55737 тис. т або 10,7 %. Балансові запаси вугілля марки К сягають 198073 тис. т, або 42,4 %. Прогнозні ресурси на родовищі пораховані тільки на полях шахт Любельські № 4 і 5 і становлять 371329 тис. т (Костик та ін., 2020).

Вугілля Любельського родовища відрізняється найвищою якістю в басейні, найменшою зольністю, вмістом сірки і найкращою здатністю до збагачення та коксування. Воно переважно коксівне і жирне марок К і Ж, а на полі шахти Любельська № 1 – коксівне.

За матеріалами ДП "Сі-Сі-Ай-Любеля" (2016), встановлено, що на ділянці Любельська № 3, зважаючи на гострий дефіцит коксівного вугілля в Україні, вугілля пласта π_7 може використовуватися для коксування, оскільки має невисоку зольність і сірчистість, вміст фосфору в межах норми та належить до марок К і Ж. Вугілля пластів π_1 , π_9 , π_8^a , π_7^a належить до марки Ж і як сировина для коксування має високу технологічну цінність, але для їх вугільних концентратів спостерігається підвищений вміст загальної сірки.

Газоносність вугільних пластів. Природна газоносність вугільних пластів вугленосної товщі родовища характеризується мінливістю як по площі, так і у вертикальному розрізі, що зумовлено геологічною історією розвитку (Анциферов та ін., 2010; Матрофайло та ін., 2017). За вмістом метану, азоту і вуглекислого газу за відомою класифікацією О.І. Кравцова (Кравцов та ін., 1980), на родовищі виділяються дві газові зони. Аналіз даних газового опробування показує, що всі вугільні пласти башкирського і серпуховського ярусів карбону залягають у метаново-азотній газовій зоні (газового вивітрювання), за винятком поля шахти Любельська № 3, де всі вугільні пласти, починаючи з π_9 залягають у метановій газовій зоні (Сокоренко та ін., 2011). Вугільні пласти π_0^6 і ν_6 на всій площі родовища залягають у метановій газовій зоні, поверхня якої знаходиться на глибинах 830–1130 м (абс. відм. – 680–800 м). Ізогаза (5 м³/т с.б.м.) проходить

на глибинах 920–1020 м (абс. відм. – 720–800 м). У північній частині родовища (поля шахт "Любельська" № 1 і 2) поверхня метанової газової зони знаходиться на глибині 830 м (абс. відм. – 680 м), починаючи з вугільного пласта π_0^6 . За даними (Бучинська та ін., 2011) границя між зоною вивітрювання та метановою зоною проходить безпосередньо над пластом π_0^6 і глибина її залягання змінюється від 800 м на півдні до 1000 м на півночі (рис. 2).

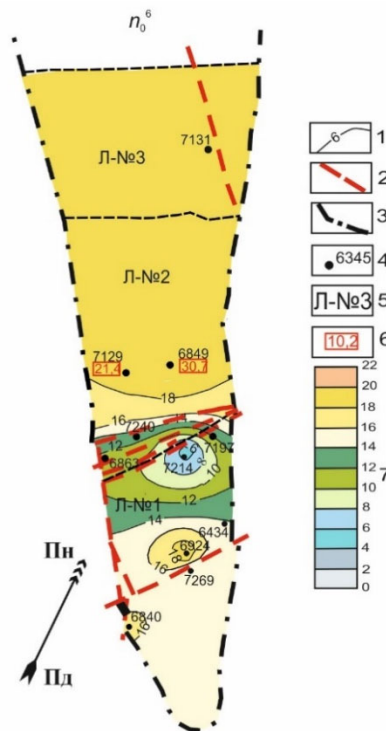


Рис. 2. Газоносність вугільного пласта π_0^6 Любельського родовища Львівсько-Волинського басейну (Бучинська та ін., 2011).

Умовні позначення: 1 – ізогази, м³/т.с.б.м.,
2 – тектонічні порушення, 3 – межі залягання пласта,
4 – свердловини, 5 – поля шахт Любельського родовища;
6 – аномальні значення газоносності,
7 – шкала газоносності (в м³/т с.б.м.)

Характеристику газових зон і компонентного складу газу у вугільних пластах по полях шахт родовища наведено в табл. 1 (Сокоренко та ін., 2011). Сучасна природна газоносність вугільних пластів π_7 , π_7^1 , π_7^{a-1} , π_7^{a-2} , π_7^a , π_8 , π_8^0 і π_9 , які залягають у метаново-азотній газовій зоні (вивітрювання), незначна і змінюється від 0,00 до 2,26 м³/т с.б.м. Вугільні пласти ν_6 , π_0^6 і π_7 , π_7^1 , π_7^a , π_8 , π_9 , які залягають у метановій газовій зоні на полях шахт Любельська № 1–4 характеризуються високою природною газоносністю – 9,60–30,70 м³/т с.б.м.

Отже, особливістю родовища є високий ступінь дегазації вугільних пластів, а в південній його частині на полях шахт Любельська № 1 і 2 у межах глибини залягання основних робочих пластів газ майже відсутній. Однак при проєктуванні вуглевидобутку на глибоких горизонтах Любельського родовища, а особливо в межах ділянок Любельська № 3 і 4, необхідно брати до уваги їхню газоносність і враховувати можливість дегазації вугільних пластів. Вугільний газ може розглядатися як самостійна копалина, видобування якої можливе в достатніх об'ємах та економічно доцільне.

Характеристика супутніх компонентів вугілля. Під час розвідувальних робіт на вугілля як основного виду

сировини на Любельському родовищі проводилися випробувальні роботи, зосереджені на отриманні даних щодо збагачення вугілля на германій, галій та інформації щодо поширення токсичних і потенційно-токсичних компонентів. Наявність підвищених концентрацій мікроелементів дозволяє розглядати вугілля як полімінеральну сировину.

Під час написання статті, узагальнення та систематизації матеріалу використовувалися спектральні аналізи середньопластових проб, яке виконувало ДП "Сі-Сі-Ай-Любеля" (2016), проводячи геолого-економічну оцінку запасів кам'яного вугілля родовища. Найцікавішими щодо потенційного використання є германій і галій, оскільки у світовій практиці розроблені методи вилучення цих елементів.

Усі вугільні пласти Любельського родовища містять германій і галій (табл. 2). Розподіл їх у стратиграфічному розрізі нерівномірний. Більш германієносні вугільні пласти b_3 , b_1 – у верхній частині розрізу, а також π_8^5 із вмістом понад 3,5 г/т сухого вугілля. Нижня частина розрізу характеризується більш низькими показниками вмісту германію (пласти π_8^B , π_8 , π_7^B , π_7). Такий характер розподілу узгоджується зі зростанням ступеня метаморфізму відповідно до

глибини залягання, у разі збільшення якої спостерігається зниження його вмісту (Бучинська та ін., 2019).

У межах Любельського родовища по площі спостерігається хвилеподібний характер розподілу концентрацій германію і галію з північного сходу на південний захід. Це загалом збігається з напрямом вуглефікації по басейну, згідно з яким південно-західна частина більше метаморфізована (Юдович та ін., 1985).

Хвилеподібний характер розподілу концентрацій спричинений процесом седиментації, який підпорядкований конседиментаційним тектонічним рухам, що мали вплив на водний режим палеоторфовищ, літологічну і фаціальну мінливість вугленосних відкладів у цілому. Встановлено, що накопичення галію у вугіллі відбувалося сингенетично нагромадженню вугілля, а джерелом його є продукти розмиву кори вивітрювання (Юдович та ін., 1985). Часті зміни та нерівномірність розподілу германію свідчить про суттєвий вплив коливальних рухів незначної амплітуди, які загалом не змінювали типу седиментації, а лише диференціювали геохімічну ситуацію (Лелик та ін., 1991; Бучинська та ін., 2015).

Таблиця 1

Характеристика газових зон вугленосних відкладів і вугільних пластів Любельського родовища кам'яного вугілля (за (Сокоренко та ін., 2011))

Поле шахти	Газова зона	Синоніміка вугільного пласта	Компонентний склад газу, %			Природна газонасиченість вугільного пласта, м³/т с. б. м.
			CO ₂	CH ₄	N ₂	
Любельська 1	метаново-азотна	π_7 , π_7^1 , π_7^{B-1} , π_7^{B-2} , π_8 , π_8^0	0,10–5,68	0,00–28,55	61,5–99,7	0,00–1,98
	метанова	π_0^6	0,71–1,40	53,9–93,8	5,64–39,16	12,30–20,57
Любельська 2	метаново-азотна	π_7 , π_7^1 , π_7^{B-1} , π_7^B , π_8 , π_8^0 , π_9	0,51–16,50	0,25–28,55	63,30–99,32	0,00–1,78
	метанова	π_0^6	0,05–2,10	51,14–92,24	6,77–49,93	4,61–30,70
Любельська 3	метанова	π_7 , π_7^1 , π_7^B , π_8 , π_9	0,08–3,64	50,55–97,34	3,82–41,22	9,78–22,48
Любельська 4	метаново-азотна	π_8^B , π_9	0,20–0,48	1,65–15,34	71,72–97,02	0,00–0,70
	метанова	π_7^B	0,09–0,15	51,5–84,55	39,70–48,50	9,60
Любельська 5	метаново-азотна	π_7^B , π_8^0 , π_8^B , π_9	0,16–0,63	11,97–33,95	52,19–98,07	0,00–2,26
	метанова	π_0^6	0,20–0,45	69,05–80,79	19,21–30,95	10,90–20,50

Таблиця 2

Вміст германію і галію у вугільних пластах поля шахти Любельська № 1 і 2 (за матеріалами ДП "Сі-Сі-Ай-Любеля", 2016)

Вугільний пласт	Германій, г/т вугілля	Галій, г/т вугілля
b_3	<u>0,9–6,2*</u> 3,63 (8)	<u>2,5–15,8</u> 9,16 (8)
b_1	<u>0,4–11,7</u> 3,9 (11)	<u>1,8–16,6</u> 6,9 (8)
π_9	<u>0,9–3,9</u> 2,2 (15)	<u>1,6–15,8</u> 6,7 (11)
π_8^5	<u>2,5–4,5</u> 3,5 (2)	<u>8,36–8,36</u> 8,36 (1)
π_8^B	<u>0,7–5,1</u> 2,9 (10)	<u>3,3–15,5</u> 7,17 (6)
π_8	<u>1,0–2,7</u> 1,6 (3)	<u>3,4–5,2</u> 4,3 (2)
π_7^B	<u>1,1–6,0</u> 2,54 (20)	<u>3,0–11,3</u> 6,3 (14)
π_7	<u>0,60–7,0</u> 2,3 (18)	<u>2,8–11,8</u> 5,7 (13)

Примітка: * у чисельнику значення від – до; у знаменнику – середнє значення, у дужках кількість визначень.

Дослідження ділянки Любельська № 3 (Бучинська та ін., 2019), за висновками Інституту вугільних енерготехнологій (ІБЕ) Національної академії наук України (м. Київ, 2015 р.), показало що вугілля пластів b_1 , π_9 , π_8^B , π_7^B , яке планується використовувати для спалювання

в енергетичних цілях, попутно може використовуватися як джерело германію. Підраховані запаси германію щодо фактичного вмісту в енергетичному вугіллі ділянки Любельська № 3 за категорією С₂ становили 248,41 т. Запаси галію не підраховувалися у зв'язку із вмістом, що

значно нижчий від концентрацій, які підлягають кількісній оцінці, з нерівномірністю розподілу елементу в межах поля шахти та відсутністю розробленої технології видобутку галію з вугілля.

Середні значення вмісту рідкісних і розсіяних елементів переважно дорівнюють фоновим або мають незначні відхилення в той чи інший бік. Однак слід зауважити, що в окремих пробах по вугільних пластах рівня промислового вмісту досягають ванадій (b_1 , 10^8), кобальт (10^7), які можуть вважатися потенційно-токсичними компонентами (Бучинська та ін., 2020), але в загальній масі вони не перевищують ГДК (гранично допустимі концентрації).

Середні значення вмісту токсичних і потенційно токсичних елементів по вугільних пластах шахтного поля – на рівні фонових концентрацій, значно нижчі ГДК і не будуть становити небезпеки під час експлуатації родовища (Про затвердження..., 1997). Із збільшенням ступеня метаморфізму відмічається перерозподіл елементів, а інколи зменшення їх концентрацій.

Варто звернути увагу на нагромадження відходів потенційної діяльності підприємств вуглевидобувної промисловості (Іванців та ін., 1999). Вони можуть бути оцінені як техногенні родовища для вилучення цінних мікроелементів. У роботах (Лелик та ін., 1995; Бик та ін., 2000) встановлено, що для порід відвалів характерний підвищений вміст рідкісних і розсіяних елементів, таких як германій, галій, срібло, мідь, молибден, скандій та ін. Економічна доцільність детального вивчення цих порід з метою вилучення з них цінних компонентів буде слугувати аналітичною базою для впровадження вигідних технологій.

Висновки. Нарощування мінерально-сировинної бази Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну можливо за рахунок будівництва та експлуатації гірничо-видобувних комплексів у межах родовищ Південно-Західного вугленосного району. У статті за результатами літературних джерел та власних досліджень попередніх років проаналізовано потенційну можливість використання супутніх ресурсів вугленосної товщі, що могло б забезпечити функціонування шахтного комплексу як рентабельного багатопродуктового виробництва.

Любельське родовище ЛВБ має значні запаси високоякісного вугілля, яке може використовуватися для коксування, що буде значним внеском у розвиток енергетичної бази України. Значна дегазація вугленосної товщі сукупно з високими технологічними якість вугілля і є причиною підвищеного інтересу до Любельського родовища. Вугільний газ глибоких горизонтів родовища може розглядатися як самостійна копалина, видобування якої можливе в достатніх об'ємах та економічно доцільне. Вугілля Любельського родовища може також бути придатним як сировина для видобутку германію. За окремими пробами концентрації галію, ванадію і кобальту досягають рівня умовно промислових, але не можуть використовуватися через нерівномірність розподілу елементів і відсутність розроблених технологій видобутку.

Проектуючи економічно вигідні технологічні схеми вуглевидобутку, потрібно враховувати весь комплекс показників щодо освоєння супутніх корисних копалин і компонентів вугілля. Комплексний підхід до видобування вугілля з вивченням газоносності вугленосної товщі, дослідженням вмісту і поширення мікроелементів у вугіллі та перспективності їх промислового використання дасть можливість оцінити потенціал шахти. Застосування таких засад один із перспективних напрямків стійкого розвитку вугледобувних регіонів з поступовим переходом від моноцентованого виробництва до багатопрофільного спрямування.

Список використаних джерел

- Анциферов, А.В., Голубев, А.А., Канін, В.А. и др. (2010). Газоносность и ресурсы метана угольных бассейнов Украины. Том 2. Донецк: Изд-во Вебер (Донецкое отделение).
- Бик, С.І., Узіюк, В.І., Лазар, В.О., Аненков, В.А. (2000). Еколого-біохімічні особливості відходів вугілля Львівсько-Волинського басейну. *Вугілля України*, 7, 22–23.
- Бучинська, І.В., Явний, П.М., Книш, І.Б., Шевчук, О.М. (2011). Вугленосність і розподіл вугільних газів у розрізі нижнього карбону Любельського родовища Львівсько-Волинського басейну. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 3–4 (156–157), 57–67.
- Бучинська, І.В., Лазар, Г.І., Савчинський, Л.О., Шевчук, О.М., Круглова, Р.М. (2015). Геохімія германію у вугіллі Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 1–2 (166–167), 32–39.
- Бучинська, І.В., Лазар, Г.І. (2019). Германієносність вугілля Любельського родовища Львівсько-Волинського басейну. *Здобутки і перспективи розвитку геологічної науки в Україні: збірник тез наукової конференції, присвяченої 50-річчю Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка*, Київ, 14–16 травня 2019 р. Т. 2, 31–32.
- Бучинська, І.В., Шевчук, О.М. (2020). Комплексне освоєння Любельського родовища Південно-Західного вугленосного району Львівсько-Волинського басейну. *Сучасні проблеми гірничої геології та геокології: збірник матеріалів міжнародної наукової конференції*, Київ, 10–11 грудня 2020 р., 58–61.
- Бучинська, І.В., Матрофайло, М.М. (2021). Перспективи нарощування мінерально-сировинної бази Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. *Гірничі геологія та геокологія*, 1, 5–23. <http://journal.geokomine.com.ua/article/view/234260>
- Іванців, О.Є., Лизун, О.О., Кухар, З.Я. (1999). Геолого-екологічні та соціальні проблеми Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 2, 20–28.
- Костик, І.О., Бучинська, І.В., Побережський, А.В. (2020). Класифікація запасів вугілля Тягівського і Любельського родовищ Південно-Західного вугленосного району Львівсько-Волинського басейну за основними природними показниками. *Геологічний журнал*, 1 (374), 53–69. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.1.214013>
- Кравцов, А.І., Лидин, Г.Д. (1980). Миграция газов и газовая зональность. В *Газоносность угольных бассейнов и месторождений СССР*. Москва: Недра, 56–73.
- Кушнірук, В.А. (1978). Газоносность угленосной толщи Львовско-Волинского угольного бассейна. Киев: Наук. думка.
- Лелик, Б.І., Степаненко, Я.Г., Дмитренко, М.В. (1995). Актуальність геоекологічних досліджень відходів діяльності підприємств Львівсько-Волинського басейну. *Вугілля України*, 12, 16–17.
- Лелик, Б.І., Шульга, В.Ф. (1991). Особливості розподілу рідких і розсіяних елементів у вугленосній формації Львівсько-Волинського басейну. *Доп. АН УРСР*, 1, 70–73.
- Матрофайло, М.М., Бучинська, І.В., Побережський, А.В. (2017). Походження і розподіл вуглеводневих газів у вугленосних відкладах Львівсько-Волинського басейну. *Геологія і геохімія горючих копалин*, 3–4 (172–173), 87–105.
- Павлюк, М.І., Побережський, А.В., Бучинська, І.В. (2015). Перспективи розвитку вуглевидобувного комплексу Львівсько-Волинського басейну (Любельське родовище). *Геологія горючих копалин: досягнення і перспективи: Матеріали міжнародної наукової конференції*, Київ, 2015 р., 2–4 вересня, 61–65.
- Про затвердження Інструкції про зміст, оформлення і порядок подання в ДКЗ України матеріалів з геолого-економічної оцінки запасів вугілля і горючих сланців. (1997). Наказ ДК України по запасах корисних копалин при Держкомгеології України від 3 жовтня 1997 року № 83. http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/REG2303.html
- Сокоренко, С., Костик, І., Матрофайло, М. (2011). Особливості сучасної природної газоносності вугільних пластів та вуглевмісних порід Любельського родовища кам'яного вугілля Львівсько-Волинського басейну. *Геолог України*, 2 (34), 81–89.
- Юдович, Я.Э., Кетрис, М.П., Мерц, А.В. (1985). Элементы-примеси в ископаемых углях. Ленинград: Наука
- Vivcharenko, O.V. (2014). Restructuring of coal industry in Ukraine. *Min. miner. depos.*, 8 (1), 7–12. <https://doi.org/10.15407/mining08.01.007>

References

- Antsyferov, A.V., Golubev, A.A., Kanin, V.A. et al. (2010). Gas content and methane resources of coal basins of Ukraine. Vol. 2. Donetsk: Weber Publishing House (Donetsk branch), 478. [in Russian]
- Buchynska, I.V., Shevchuk, O.M. (2020). Integrated development of Lyubelya field of the South-Western coal-bearing region of the Lviv-Volyn Basin. *Modern problems of mining geology and geocology: a collection of abstracts of the International scientific conference, Kyiv, December 10–11, 2020*, 58–61. [in Ukrainian]
- Buchynska, I.V., Lazar, G.I. (2019). Germanicity of coal of the Lyubelya deposit of the Lviv-Volyn basin. *Achievements and prospects for the development of geological science in Ukraine: a collection of abstracts of a scientific conference dedicated to the 50th anniversary of the M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation, Kyiv, May 14–16, 2019*, Vol. 2, 31–32. [in Ukrainian]
- Buchynska, I.V., Lazar, G.I., Savchynsky, L.O., Shevchuk, O.M., Kruglova, R.M. (2015). Geochemistry of germanium in the coal of the Lviv-Volyn coal basin.

Geology & Geochemistry of Combustible Minerals, 1–2 (166–167), 32–39. [in Ukrainian]

Buchynska, I.V., Matrofailo, M.M. (2021). Prospects for increasing the mineral resource base of the Lviv-Volyn coal basin. *Mining geology and geoecology*, 1, 5–23. <http://journal.geoekomine.com.ua/article/view/234260> [in Ukrainian]

Buchynska, I.V., Yavny, P. M., Knysh, I.B., Shevchuk, O.M. (2011). Coal content and distribution of coal gases in the Lower Carboniferous section of the Lyubelya deposit of the Lviv-Volyn basin. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, 3–4 (156–157), 57–67. [in Ukrainian]

Byk, S.I., Uziuk, V.I., Lazar, V.O., Anenkov, V.A. (2000). Ecological and biochemical features of coal waste of the Lviv-Volyn basin. *Coal of Ukraine*, 7, 22–23. [in Ukrainian]

Ivantsiv, O.E., Lyzun, O.O., Kuhar, Z.Y. (1999). Geological, ecological and social problems of the Lviv-Volyn coal basin. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, 2, 20–28. [in Ukrainian]

Kostyk, I.O., Buchynska, I.V., Poberezhskyy, A.V. (2021). Classification of coal reserves of Tyaglivsky and Lyubelya deposits of the South-Western coal-bearing district of the Lviv-Volyn basin according to the main natural indicators. *Geological Journal*, 1 (374), 53–69. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2021.1.214013> [in Ukrainian]

Kravtsov, A.I., Lidin, G.D. (1980). Gas migration and gas zoning. In: Gas content of coal basins and deposits in the USSR. Moscow: Nedra, 56–73. [in Russian]

Kushniruk, V.A. (1978). Gas content of the coal-bearing strata of the Lvov-Volyn coal basin. Kiev: Naukova dumka, 120. [in Russian]

Lelyk, B.I., Shulga, V.F. (1991). Peculiarities of distribution of liquid and scattered elements in the coal-bearing formation of the Lviv-Volyn basin. *Extra USSR Academy of Sciences*, 1, 70–73. [in Ukrainian]

Lelyk, B.I., Stepanenko, Ya.G., Dmytrenko, M.V. (1995). Relevance of geoecological research of waste enterprises of the Lviv-Volyn basin. *Coal of Ukraine*, 12, 16–17. [in Ukrainian]

Matrofailo, M.M., Buchynska, I.V., Poberezhskyy, A.V. (2017). Origin and distribution of hydrocarbon gases in coal-bearing deposits of the Lviv-Volyn coal basin. *Geology & Geochemistry of Combustible Minerals*, 3–4 (172–173), 87–105. [in Ukrainian]

On approval of the Instruction on the content, design and procedure for submission to the SCC of Ukraine of materials on geological and economic assessment of coal and oil shale reserves. (1997). Order of the SC of Ukraine on mineral reserves at the State Committee of Geology of Ukraine of October 3, 1997, No. 83. Kyiv. http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/REG2303.html [in Ukrainian]

Pavlyuk, M.I., Poberezhskyy, A.V., Buchynska, I.V. (2015). Prospects for the development of the coal-mining complex of the Lviv-Volyn basin (Lyubelya deposit). *Geology of combustible minerals: achievements and prospects: materials of the international scientific conference*, Kyiv, September 2–4, 2015, 61–65. [in Ukrainian]

Sokorenko, S., Kostyk, I., Matrofailo, M. (2011). Features of modern natural gas potential of coal seams and coal-bearing rocks of the Lyubelya coal deposit of the Lviv-Volyn basin. *Geologist of Ukraine*, 2 (34), 81–89. [in Ukrainian]

Vivcharenko, O.V. (2014). Restructuring of coal industry in Ukraine. *Min. miner. depos.*, 8 (1), 7–12. <https://doi.org/10.15407/mining08.01.007>

Yudovich, Ya.E., Ketris, M.P., Merts, A.V. (1985). Elements-impurities in fossil fields. Leningrad: Nauka, 239. [in Russian]

Надійшла до редколегії 18.11.22

I. Buchynska, PhD (Geol.), Senior Research
e-mail: ibuchynska@ukr.net

M. Matrofailo, PhD (Geol.-Min.), Senior Research
e-mail: mmatrofailo@gmail.com

A. Poberezhskyy, PhD (Geol.-Min.), Senior Research
e-mail: igggk@mail.lviv.ua

Institute of Geology and Geochemistry of Combustible Minerals of NAS of Ukraine,
3a Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine

COMPREHENSIVE DEVELOPMENT OF ASSOCIATED MINERALS AND COAL COMPONENTS OF THE LYUBELYA DEPOSIT OF THE LVIV-VOLYN BASIN

The potential of coal deposits is determined not only by the establishment of coal bearing capacity, but also by a number of criteria determined by the complex extraction of associated minerals and coal components. One of the main reserves of replenishment of the mining mine fund of the Lviv-Volyn coal basin (LVB) is the South-Western coal-bearing area. The Lyubelya coal deposit is located in the south-western part of the Lviv-Volyn basin within the Kariv syncline.

The Lyubelya deposit is the most submerged part of the LVB with the most complete stratigraphic section. The coal-bearing stratum is gas-bearing and germanium-bearing. Integrated use of the raw material base of LVB with the use of certain technologies of preliminary gas extraction will help to increase the profitability of the coal mining complex and prevent accidents. The deposit has significant reserves of high-quality coal that can be used for coking, which will be a significant contribution to the development of the Ukraine's energy base. Coal of grades Zh, KZh and K is widespread at the Lyubelya deposit. Coking coal makes up almost half of the field's reserves. The total explored coal reserves are 522884 thousand tons. Significant degassing of the coal seam in combination with high technological qualities of coal is the reason for the increased interest in the Lyubelya deposit. In its southern part, gas is almost absent in the fields of the Lyubelya mines No. 1 and 2, within the depths of the main working layers. But coal seams v_6 , n_0^6 , n_7 , n_7^1 , n_7^2 , n_8 , n_9 lie in the methane gas zone in the fields of Lyubelya mines No. 1–4 and are characterized by high natural gas content – from 9.60 to 30.70 m³/t s.b. Methane gas zone is immersed in the direction of the bottom of the Kariv syncline. When designing coal mining in the deep horizons of the Lyubelya field, it is necessary to take into account their gas potential and the possibility of degassing of coal seams. Coal gas can be considered as a stand-alone mineral that can be extracted in sufficient quantities and economically feasible. Coal from the Lyubelya deposit may also be suitable as a raw material for the extraction of germanium. Thus, the estimated reserves of germanium in terms of actual content in the coal of the Lyubelya No. 3 section in category C₂ amounted to 248.41 tons.

The Lyubelya deposit of LVB has significant reserves of high-quality coal that can be used for coking, which will be a significant contribution to the development of the Ukraine's energy base. When designing cost-effective technological schemes of coal mining, it is necessary to take into account the whole set of indicators for the development of related minerals and coal components.

Keywords: coal reserves, gas-bearing capacity, Germanium-bearing capacity, complex use, Lyubelya deposit, Lviv-Volyn basin.

УДК 511/477/

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.10>О. Комлев, д-р геогр. наук, проф.
e-mail: morpha2007@ukr.netКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,
географічний факультет, просп. Академіка Глушкова, 2, м. Київ, 03680, Україна

ПРО ЗОНАЛЬНІСТЬ ІЛЬМЕНІТОВИХ РОЗСИПІВ ІРШАНСЬКОГО РОЗСИПНОГО ПОЛЯ УКРАЇНСЬКОЇ СУБПРОВІНЦІЇ РОЗСИПНОЇ ПРОВІНЦІЇ СХІДНОЇ ЄВРОПИ

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

На території України розташовані титанові і титан-цирконієві розсипні родовища світового рівня. Разом вони утворюють Українську субпровінцію розсипної провінції Східної Європи. Сюди входить і Іршанське розсипне поле розвитку ільменітових розсипів ближнього зносу. У статті наведено результати дослідження просторового співвідношення розсипів і корінних джерел, вертикальної і горизонтальної зональності речовинного складу розсипів на 9 детальних ділянках. Це дозволило виявити додаткові критерії для встановлення генезису розсипів, що важливо для проведення палеогеографічних і палеогеоморфологічних робіт. Корінними джерелами титанових розсипів Іршанського розсипного поля були переважно пластові тіла різної товщини, які представляли самостійні структури або були елементами нині зруйнованих куполоподібних структур фундаменту. Корінні тіла і розсипи в плані збігаються цілком, частково або не збігаються. Критерій збігу корінних і розсипних тіл указує, що корисний компонент від корінних тіл до розсипних переміщувався на відстань до кількох сотень метрів. Розсипні родовища, що містяться у відкладах полтавської світи пізньоолігоцен-середньоміоценового віку, за генезисом елювіальні, елювіально-делювіальні, делювіальні, делювіально-алювіальні, пролювіальні, алювіальні. Рельєф того часу сприяв збереженню в розсипах концентрацій корисного компонента корінних джерел і їх збагаченню. Ільменітові розсипи формувались на всіх гіпсометричних рівнях давнього рельєфу, але найбільш значні – на нижньому рівні (днища і схили давніх долин). Результати аналізу гранулометричного і хімічного складу розсипів ільменіту, гранулометричного і речовинного складу відкладів, що вміщують розсипи, вивчалися з урахуванням структурно-тектонічних, палеогеоморфологічних умов території. Аналізи відбирались методом інтервального опробування розрізів. За результатами їх статистичної обробки вираховувались кількісні показники, які характеризують гранулометричний і хімічний склад ільменіту. Вивчення їх дозволило у відкладах полтавської світи виявити різні типи розрізів (8 – за гранулометрією і 10 – за змінністю хімічного складу ільменіту), вертикальної і горизонтальної зональності. Отримані результати важливі для розвитку геоінформаційного моделювання розсипних родовищ і дозволяють вирішувати традиційні завдання (палеогеоморфологічні реконструкції, вплив палеорельєфу на вміст і якісний склад ільменіту, виявляти давні конседиментаційні структури, місця тектонічних інверсій).

Ключові слова: ільменіт, ільменітові розсипи, корінні джерела, зональність розсипів, палеорельєф.

Актуальність теми дослідження. На території України розташовані великі титанові і титан-цирконієві розсипні родовища світового рівня. Вони утворюють Українську розсипну субпровінцію, яка є частиною розсипної провінції Східної Європи. Вивчення цих розсипних родовищ, крім практичного, має важливе наукове і методичне значення для палеогеографії, палеогеоморфології, геоморфосистемного і неотектонічного аналізу. Дані щодо їх вивчення дозволяють проводити палеорекострукції генетичного, динамічного, історичного характеру, вивчати циклічність розвитку геоморфосистем, неотектонічні структури та їхню динаміку.

Стан вивчення і мета дослідження. Титанові і титан-цирконієві розсипні родовища Української розсипної субпровінції досліджуються давно. У різні роки вийшли праці С. Бельського, М. Вадимова, С. Василенка, М. Веклича, Л. Галецького, А. Додатка, Є. Дудровича, М. Дядченко, П. Заморія, В. Кондрачука, О. Комлева, Ю. Кошика, Ю. Мухіна, В. Овчаренка, Ю. Полканова, Г. Проскуріна, О. Ремезової, І. Романова, Т. Свівальневої, В. Тарасенка, В. Тимофєєва, А. Хатунцевої, С. Цимбала, С. Швайберова, О. Яременко та ін. (Додатко, 1976; Дудрович, Мухін, 1977; Комлев, Жилкін, 2022; Полканов, Цымбал, 1987; Проскурин, 1984; Проскурин *и др.*, 1987; Свівальнева, 2014; Тарасенко, Бойко, 1983; Швайберов, 1987; Яременко, 2020), які були присвячені вивченню корінних джерел, палеогеографічних, палеогеоморфологічних, структурно-тектонічних чинників утворення титанових і титан-цирконієвих розсипів, їх речовинного складу і осадових порід, які вміщують розсипи, фізичним і хімічним особливостям мінералів розсипів, підготовці виявлених розсипних родовищ до промислової експлуатації (М. Рубан, В. Макаров, В. Лунько, Г. Проскурін, С. Швайберов, Л. Токарська, Л. Фещенко, Ю. Баранов, Л. Бочай, Д. Гурський, Г. Веселовський, О. Лазніков, О. Лисенко, Т. Поддубна).

В останні роки інтенсивно розвивається напрям геоінформаційного моделювання розсипних родовищ. Питаннями цифрового структурно-літологічного і геологодинамічного моделювання титанових розсипів в Україні займаються О. Ремезова, Д. Хрущов, С. Василенко, О. Кравченко, Т. Охоліна, О. Ковалевич (Василенко, 2015; Кравченко, 2016; Лисенко, 2017; Ремезова, 2011). Роботи з геоінформаційного моделювання розсипів спираються на сучасні технологічні можливості, вони зазвичай заформалізовані, недостатньо враховують закономірності морфогенезу, літогенезу і рудогенезу (які є елементами єдиного процесу – морфоліторудогенезу) розсипних родовищ. Конкретні дані, що розкривають різні просторово-часові особливості морфоліторудогенезу на окремих ділянках розвитку розсипних родовищ становлять особливий інтерес. Вони дозволяють проводити геоінформаційне моделювання утворення розсипних родовищ більш точно і ефективніше вести пошукові роботи. Важливими питаннями тут є виявлення корінних джерел і їх просторове зіставлення з розсипними тілами, вивчення їх вертикальної і горизонтальної зональності розсипів.

На наш погляд, особливо інформативними для розгляду цих питань є розсипи ближнього зносу. До них належать, зокрема, титанові (ільменітові) розсипи Іршанського розсипного поля, які розташовані в межах Української субпровінції титанових і титан-цирконієвих розсипних родовищ. Ці родовища детально досліджені, для них створено значну інформаційну основу. Використана певною мірою вона дозволить вирішувати вищезазначені практичні питання пошуків і розробки розсипних родовищ, а також теоретичного і методичного характеру, які важливі для палеогеоморфології, палеогеографії, неотектоніки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Іршанське розсипне поле утворює ряд великих і більш дрібних титанових (переважно ільменітових) розсипних родовищ.

За схемою районування (Геологія..., 2001), вони належать до Волинського розсипного району Української субпроvincії розсипної проvincії Східної Європи.

Ми проводили спеціальні дослідження на 16 розсипних ділянках, які розробляються або належать до категорії перспективних. У статті наведено результати, отримані на 9 ділянках (у дужках їхні номери в тексті): Шершнівський (1), Злобичський (2), Паромівський (3), Правобережний (4), Березівський (5), Валки-Гацківський (6), Катеринівський (7), Лівобережний (8), Ісаківський (9). Основні продуктивні пласти розсипів тут розташовані у відкладах полтавської світи пізньоолігоцен-середньоміоценового віку. Місцями, у заглибленнях похованого рельєфу, тут також зберігаються залишки середньоруських, ранньокрейдових, середньоеоценових розсипів. Розсипи розташовані: у структурно-тектонічному відношенні – у межах Коростенської блокової структури 3 порядку Українського щита; у геоморфосистемному відношенні – у Малинській історико-динамічній басейновій геоморфосистемі (Комлев, 2005); у сучасному рельєфі – у верхів'ї басейна р. Ірша.

Титанові (ільменітові) розсипи на досліджених ділянках просторово і генетично пов'язані з основними і ультраосновними породами Коростенського плутону кристалічного фундаменту щита. Корінні тіла розсипів у них часто розташовані прямо під ними. Ці тіла відрізняються розмірами, формою, умовами залягання, товщиною, вмістом ільменіту. Нерідко вони являють собою майже суцільну руду. Просторове взаєморозташування рудних тіл і розсипів – один із критеріїв установлення генезису розсипів, вивчення вертикальної і горизонтальної

зональності розсипів, що важливо для проведення палеогеографічних і палеогеоморфологічних робіт.

Просторові співвідношення розсипів і корінних тіл вивчалися на всіх 9 досліджених розсипних ділянках. В їхніх межах відбувалось накопичення відкладів полтавської світи і континентальних розсипів різного генезису. Найбільше в палеодолинах – їх руслах, розширених ділянках (часто зайнятих озерами), схилах.

Найбільші розсипні тіла генетично пов'язані з корінними джерелами, які найчастіше являють собою пластів тіла, товщина яких становить від перших сантиметрів і до кількох десятків метрів. Пласти часто вигнуті, оскільки вони могли бути елементами куполоподібних структур фундаменту. Вони мали різний радіус кривизни і нині частково зберігаються в похованому стані. Куполоподібні структури тоді виходили на рівень денудаційного зрізу і тому залишилися тільки різною мірою їх зруйновані ядра. Куполоподібні структури продовжуються на різну глибину. Іншим типом корінних рудних структур є окремі пласти та їхні серії. Вони субпаралельні, направлені назустріч і під кутом до поверхні. У плані корінні тіла *вузькі видовжені, ізометричні, неправильні (підково-, чотко-, кулісоподібні)*. Корінні тіла експонувались на всіх рівнях давнього рельєфу.

Були встановлені основні типи просторового співвідношення корінних тіл і пов'язаних з ними розсипів, які в плані: 1) *повністю збігаються*, площа розсипного тіла більша і менша за корінне (рис. 1а); 2) корінне і розсипне тіла *частково збігаються* (рис. 1б); 3) розсипне і корінне тіла *не збігаються* (рис. 1в).

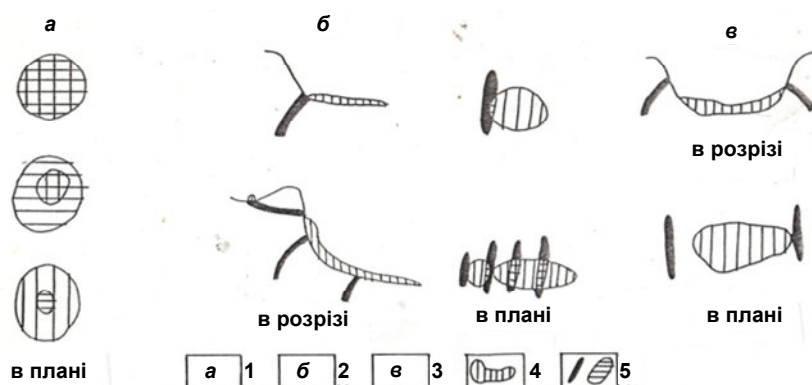


Рис. 1. Просторове положення джерел і розсипів:

1 – повний збіг, 2 – частковий збіг, 3 – незбіг, 4 – розсипи, 5 – корінні джерела

Вивчення просторового співвідношення розсипних і корінних тіл свідчать, що ільменіт від останніх до місць утворення розсипних тіл міг переміщуватись на відстань від кількох метрів до кількох сотень метрів. На це значною мірою впливав давній рельєф – характер поверхні, її нахил, морфологія і густота ерозійних форм.

Палеогеоморфологічні карти пізньоолігоцен-середньоміоценового часу, з винесеними на них виявленими корінними і розсипними тілами, та інші дані свідчать про їх елювіальне, елювіально-делювіальне, делювіальне, делювіально-алювіальне, пролювіальне, алювіальне походження. У розсипах первинної концентрації ільменіту з корінних тіл і кори вивітрювання кристалічних порід зберігались і збагачувались.

Ільменітові розсипи Іршанського рудного поля у відкладах полтавської світи утворювались на всіх гіпсометричних рівнях давнього рельєфу, а найбільші з них – на нижньому (днища і схили давніх долин). Тут часто зберігаються

досить повні розрізи відкладів полтавської світи, потужність яких 1,5–16,5 м (у середньому 5,0–14,0 м) (Комлев, 1988).

Методика вивчення зональності ільменітових розсипів. Зональність будови ільменітових розсипів виявляється під час вивчення гранулометричного і речовинного складу монофракції ільменіту. Основну інформацію тут дають результати обробки їх аналізів. Найефективнішим виявляється їх використання в комплексі з іншими методами, передусім крупномасштабних палеогеоморфологічних реконструкцій цих ділянок. Зональність ільменітових розсипів вивчалась на основі використання монофракції ільменіту. Це 1998 гранулометричних аналізів і 1883 аналізів хімічного складу ільменіту, а також 150 аналізів повного і 524 аналізів полімінерального складу розсиповмісних порід. Їх було відібрано у 68 точках перетинів давніх долин на 9 ділянках розсипних родовищ. Також було враховано дані приблизно 5 тис. грануло-

метричних і 10 тис. мінералогічних аналізів осадових порід з-за меж детальних ділянок.

Гранулометричні аналізи виконувались як вагові. За спеціальною програмою вони переводились у кількісні. Для вагової і кількісної форм представлення результатів графічним і аналітичним способами підраховувались гранулометричні коефіцієнти і статистичні показники. Вони часто корелюються і з різною контрастністю відображають природні явища. Ці коефіцієнти і показники характеризують емпіричний полігон розподілу (ЕПР) відкладів, такі його міри як: 1) розподіл (середнє); 2) сортованість (стандартне відхилення, коефіцієнти варіації, ентропійна міра відсортованості); 3) відхилення від нормального закону розподілу (коефіцієнти ексцесу і асиметрії). Враховувались також суми піщаних, гравійних і глинистих фракцій. Далі всі ці кількісні дані переводились у генетичні, динамогенетичні і представницькі діаграми. На основі всіх цих підрахунків виводився узагальнювальний *синтетичний гранулометричний коефіцієнт* (СГК) на основі середнього розміру, сортованості, аномальних відхилень, який дозволяє якісно інтерпретувати гранулометричну структуру відкладів. На підсумкових картах СГК враховується побічно і може додатково показуватися значками.

Мінеральний склад відкладів дає важливу інформацію про стадії літогенезу, епігенез і гіпергенез. Вибір найбільш інформативних розмірних фракцій для цього не є однотайним. Тут важливо враховувати, що на стадіях переносу і відкладення субстрату на осадову диференціацію в потоці впливають розмір і питома вага зерен. Тому для реконструкції умов осадконакопичення в минулому рекомендується використовувати вихід важкої фракції, її окремі мінерали та їх співвідношення. В узагальненому вигляді на підсумкових картах використовувалася *модифікований палеогеографічний коефіцієнт* (МПК), який показує відношення стійких мінералів до суми нестійких і діагенетичних. Під час оцінювання ефективності різних мінералогічних коефіцієнтів було виявлено досить високий зворотний кореляційний зв'язок МПК з коефіцієнтом лейкоксен/ільменіт, який відображає процес руйнації ільменіту при вивітрюванні і механічному переносі.

Процес руйнації ільменіту відображають коефіцієнти окиснення, збереження, вилугування, тіоризації, гідратації ільменіту, які разом відображають і кількісно описують дві його стадії. На першій стадії в основному відбувається окиснення "свіжого" ільменіту, який надходить з магматичних порід (теоретичний склад: TiO_2 – 52,7 %, FeO – 47,3 %), часткове вилугування, руйнація кристалічної ґратки, утворення вільних оксидів титану і заліза, повне зникнення "ільменітової" фази. Результатом цієї стадії є лейкоксенований ільменіт. На другій стадії відбувається вилугування заліза, розкристалізація гідроксидів титану, яка завершується утворенням лейкоксену, а за повного вилугування заліза – псевдорутилом (Цымбал, Полканов, 1975; Цымбал і др., 1977). Під час виконання роботи більшість цих коефіцієнтів вираховувалася за використанням різних методик. Але на завершальному етапі ми використовували коефіцієнти: окиснення ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}_{\text{зар.}}$), вилугування ($\text{Fe}_{\text{зар.}}/\text{TiO}_2$), тіоризації ($\text{TiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$). Недоліком цих коефіцієнтів вважається неможливість з їх допомогою оцінювати ступінь змінності ільменіту відносно його теоретичного складу. Тому для подолання цього недоліку рекомендується використовувати (для першої

стадії) коефіцієнт збереженості, який вираховується за формулою $C_{\text{зб.}} = 114,4 \text{ FeO}/\text{TiO}_2$ (Комлев, 1988).

Вертикальна зональність ільменітових розсіпів давніх долин. Вертикальна зональність ільменітових розсіпів Іршанського розсіпного поля вивчалась за результатами інтервального опробування гранулометричного складу монофракції ільменіту і хімічного складу ільменіту по всьому розрізу долинних відкладів у 68 точках. Використовувались вищеописані кількісні показники гранулометричного і хімічного складу ільменіту. На заключному етапі обирались найбільш показові з них.

Використання *середнього розміру* (Md) дозволило виділити в долинних відкладах полтавської світи вісім типів розрізів: 1) закономірне збільшення Md зверху вниз (давні русла); 2) закономірне збільшення Md зверху вниз, але з незначними відхиленнями (давні русла); 3) циклічні зміни Md (давні русла); 4) з нечіткими циклічними змінами Md (давні русла); 5) закономірне зменшення Md зверху вниз (давні русла, схили); 6) однакові значення Md по всьому розрізу (днища палеодолин); 7) Md змінюються по всьому розрізу і зменшуються в нижній частині розрізу (всі елементи палеодолин); 8) незакономірні зміни Md по всьому розрізу (давні русла) (рис. 2).

За показниками *сортваності* (So) відкладів також виділяються вісім типів розрізів: 1) So закономірно погіршується знизу вверх (всі елементи палеодолин); 2) So закономірно погіршується знизу вверх з незначними відхиленнями (давні русла); 3) So закономірно погіршується зверху вниз (давні русла); 4) So закономірно погіршується зверху вниз із незначними відхиленнями (давні русла, схили); 5) So витримана по всьому розрізу (розширення русел); 6) So циклічно змінюється (давні русла); 7) So циклічно змінюється, але цикли неповні (давні русла); 8) незакономірні зміни So по всьому розрізу (днища долин).

Використання коефіцієнтів *змінності хімічного складу ільменіту* дозволило виділити десять типів розрізів, які характеризуються: 1) закономірним зростанням коефіцієнту змінності знизу вверх (давні русла); 2) закономірним зростанням коефіцієнта змінності знизу вверх з відхиленнями (прируслові підняття, схили палеодолин); 3) закономірним зростанням коефіцієнта змінності зверху вниз (схили палеодолин); 4) закономірним зростанням коефіцієнта змінності зверху вниз з деякими відхиленнями (давні русла); 5) витриманими значеннями коефіцієнта змінності по всьому розрізу з незначними відхиленнями (давні русла); 6) витриманими значеннями коефіцієнта змінності по всьому розрізу, з різким його зростанням або зменшенням на контакт з корою вивітрювання (днища палеодолин); 7) циклічними змінами коефіцієнта змінності (давні русла); 8) циклічними змінами коефіцієнта змінності, цикли неповні, які по-різному між собою "стикуються" (днища і схили палеодолин); 9) закономірними циклічними змінами коефіцієнта змінності, цикли неповні (днища і менше схили палеодолин); 10) незакономірними змінами коефіцієнта змінності по всьому розрізу (давні русла).

За особливостями вмісту корисного компонента в розрізах древніх долинних відкладів виділяються типи зональності, які розділені на дві великі групи: 1) з однотипною будовою – зростанням вмісту в одному напрямку (рис. 2, а, б, г, д, л); 2) з чергуванням 2 і 3 пачок порід з певними напрямками змін у них вмісту корисного компонента, які утворюють різні їх просторові поєднання (рис. 2 е-к, м, н) (Комлев, 1988).

а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м	н
↓	↑	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↑	↓	↓	↓	↑
р, т	р, м	м, с р, т	р	р	р, т	с, р	т	р	р	р	с, р	р

р 1
 т 2
 с 3
 м 4
 ↓ 5

Рис. 2. Вертикальна зональність вмісту корисного компонента розсіпів у розрізах давніх долин:
1 – русло, 2 – тераса, 3 – схил, 4 – межириччя, 5 – напрямок зміни

Горизонтальна зональність речовинного складу давніх долин. У відкладах, які виповнюють або перекривають давні форми рельєфу, у багатьох випадках проявляється і горизонтальна зональність літологічного, гранулометричного, речовинного складу. Це проявляється в давніх долинних відкладах, що виповнюють днища і схили давніх долин. Вивчаючи горизонтальну зональність, необхідно враховувати циклічність процесів долинного морфо- і літогенезу, що проявляються у вертикальній зональності давніх долинних відкладів. Тому правильно вивчати горизонтальну зональність з поправкою на циклічність накопичення відкладів. Використовувались ті ж кількісні показники речовинного складу, що і при вивченні вертикальної зональності розсіпів. На їх основі проводились палеогеоморфологічні реконструкції пізньоолігоцен-середньоміоценових річкових долин на 1–8 ділянках. На рис. 3–5 схематично показано реконструйовані елементи палеорельєфу Злобицької ділянки на основі використання кількісних гранулометричних

(Md, So) показників монофракції ільменіту і змінності хімічного складу ільменіту.

Використання Md дозволяє загалом ефективно проводити зонування давнього рельєфу і його окремих форм, особливо, якщо він змінений пізнішими тектонічними рухами. На досліджених ділянках первинний рельєф різною мірою перетворений. Використання Md дозволяє чітко виділяти схили і елементи днищ палеодолин. Md дозволяє чітко оконтурити також давні конседиментаційні структури ізометричної і витягнутої форми в пізньоолігоцен-середньоміоценових палеодолинах на Злобицькій, Паромівській, Правобережній, Березівській, Катеринівській і Лівобережній ділянках. У межах Злобицької ділянки різними методами реконструюються давні озерні басейни, берегова лінія яких збігалась з Md 0,3 мм. Просторовий розподіл значень Md дозволив виявити також місця тектонічних інверсій у долинах сучасних річок (Злобицька і Валки-Гацківська ділянки) (рис. 3).

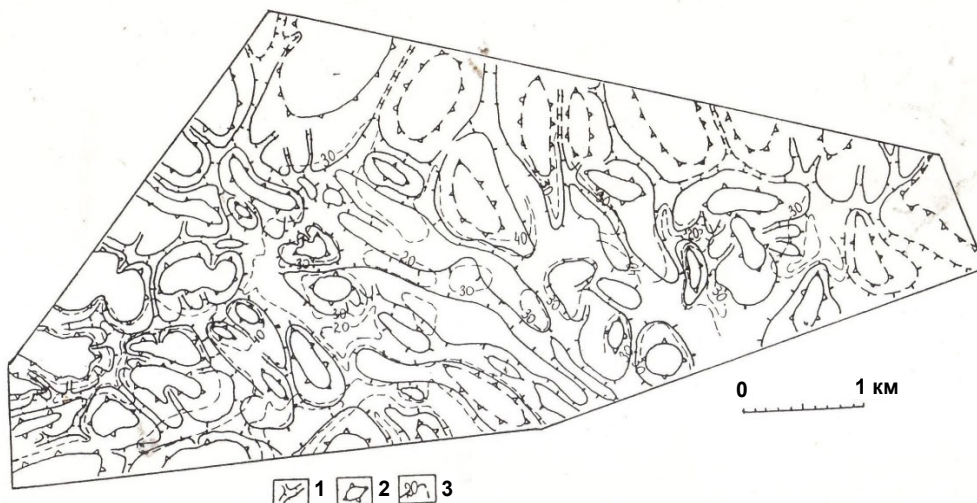


Рис. 3. Розподіл середнього розміру (Md) монофракції ільменіту в межах Злобицької розсіпної ділянки:
1 – контури палеодолин, 2 – підвищення ділянки на давніх межириччях, 3 – ізолінії середнього розміру ільменіту

Однакові значення *сортованості* спостерігаються в уламкових частинок різної гранулометричної крупності у стадію седиментогенезу. Це відбувається з різних, інколи протилежних, причин. На досліджених ділянках гранулометричний склад осадових утворень часто успадковується з кори вивітрювання кристалічних порід. За коефіцієнтом сортованості гранулометрична структура показує "зрілість" пізньоолігоцен-середньоміоценових відкладів. Особливості зміни сортованості не завжди виявляють їхній зв'язок з палеорельєфом. Показники сортованості виявляються ефективними при реконструкції

давніх озерних басейнів, розширень у палеодолинах, особливо, якщо вони використовуються в комплексі з іншими даними (гранулометричними, літологічними, палеогеоморфологічними). Встановлено, що погіршення сортованості спостерігається на підняттях і схилах палеодолин. Тут ізолінії коефіцієнта сортованості часто корелюються з особливостями палеорельєфу. На Злобицькій ділянці сортованість дозволяє виявляти древні конседиментаційні структури (рис. 4).

Палеорельєф впливав на зональний розподіл ільменіту за рівнем його *змінності* в гіпергенних умовах за

контрастного рельєфу. За умов вирівняної поверхні чинник "рельєфу" менше впливав на якісний склад ільменіту. Привертає увагу, що найбільш вивітрілий ільменіт

накопичувався в межах ізометричних і витягнутих ділянок, приурочених до давніх озерних басейнів або центральних частин розширень палеодолин (рис. 5).

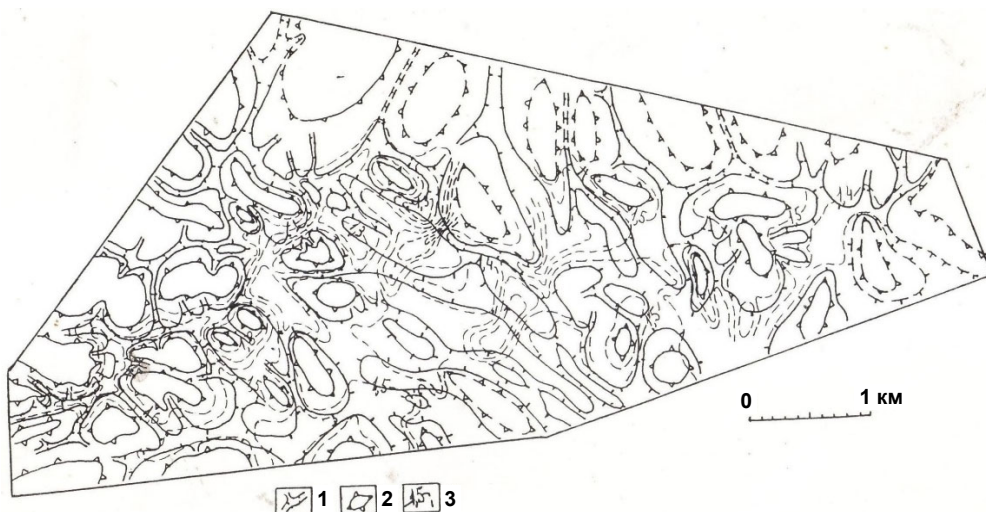


Рис. 4. Розподіл сортованості (S_o) монофракції ільменіту в межах Злобицької розсипної ділянки:
1 – контури палеодолин, 2 – підвищення ділянки на давніх межиріччях, 3 – ізолінії сортованості монофракції ільменіту

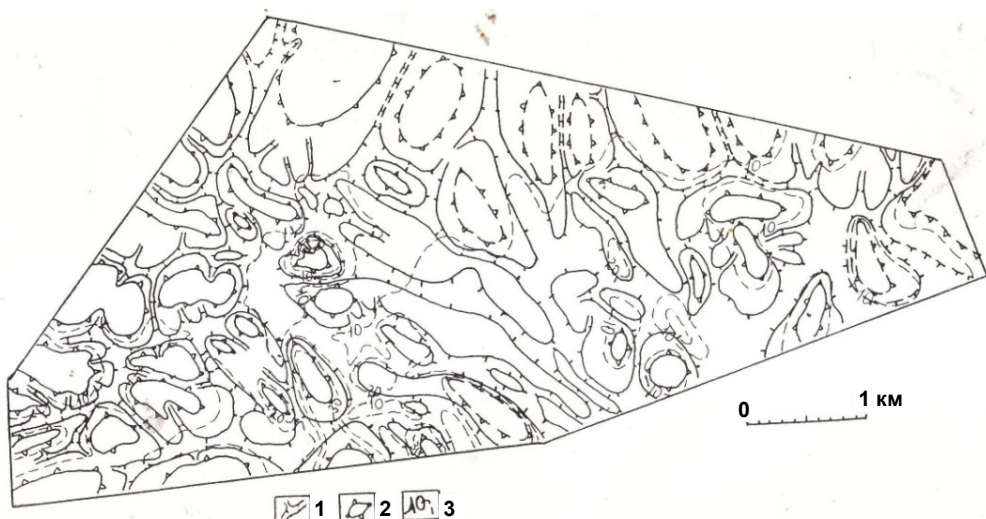


Рис. 5. Розподіл ільменіту за коефіцієнтом збереженості у межах Злобицької розсипної ділянки:
1 – контури палеодолин, 2 – підвищення ділянки на давніх межиріччях, 3 – ізолінії значень коефіцієнта збереженості ільменіту

Коефіцієнт *лейкоксен/ільменіт* вказує на значну вивітрілість розсипів пізньоолігоцен-середньоміоценового віку. Інколи його значення не корелюються з коефіцієнтом змінності ільменіту. У давніх долинних відкладах часто спостерігається зменшення значень мінералогічного коефіцієнта, що пов'язано з виносом лейкоксену з них. У той же час лейкоксен і ільменіт накопичувалися переважно на підвищеннях в давніх долинах і на давніх межиріччях. Мінералогічні коефіцієнти визначають такі ділянки розсипів як сильно вивітрілі.

У межах досліджених ділянок на горизонтальний розподіл вмісту корисного компонента впливали корінні джерела. Палеорельєф у цьому випадку проявлявся незначно. Між вмістом корисного компонента в розсипах і Md спостерігаються суттєві кореляційні зв'язки позитивного знаку. Але на горизонтальний зональний розподіл Md ільменіту у долинних відкладах, що вміщують розсипи, палеорельєф впливав більше. Мало контрастний, з численними морфологічними "пастками", він сприяв незначному переміщенню корисного компонента майже

без його розсіювання. Більшою мірою він контролював накопичення корисного компонента у дрібних фракціях.

Висновки. У межах Іршанського розсипного поля упродовж мезозою-кайнозою формувались великі і дрібніші ільменітові розсипні родовища переважно ближнього зносу. Вони мають просторовий і генетичний зв'язок з основними і ультраосновними породами кристалічного фундаменту Українського щита.

Корінні джерела розсипів, розташовані в них, являють собою пластові тіла різної товщини, які часто були елементами нині значно зруйнованих куполоподібних структур фундаменту. На експонованій поверхні корінні тіла розсипів займають різні площі, мають різну форму, умови залягання, вміст ільменіту. Корінні і розсипні тіла в плані збігаються повністю, збігаються частково, не збігаються. Ільменіт корінних тіл у розсипні переміщувався на відстань від кількох метрів до кількох сотень метрів.

Просторове взаєморозташування корінних і розсипних тіл – це важливий критерій встановлення генезису розсипів, використання якого, в комплексі з іншими,

дозволяють ідентифікувати основні продуктивні пізньо-олігоцен-середньоміоценові розсипи полтавської світи за генезисом як елювіальні, елювіально-делювіальні, делювіальні, делювіально-алювіальні, пролювіальні і алювіальні.

Давній рельєф того часу сприяв збереженню в розсипах первинних концентрацій корисного компонента з корінних тіл та їх збагаченню. Ільменітові розсипи Іршанського рудного поля утворювалися на всіх гіпсометричних рівнях давнього рельєфу, але найбільше на нижньому (днища і схили давніх долин).

Зональність ільменітових розсипів вивчалась за даними гранулометричного складу монофракції ільменіту і змінності хімічного складу ільменіту в комплексі зі структурно-тектонічними і палеогеоморфологічними даними.

Вертикальна зональність в ільменітових розсипах вивчалась на прикладі максимально повних розрізів долинних відкладів, які збереглися. Методом поінтервального опробування розрізів відбирались аналізи монофракції ільменіту – для вивчення їх гранулометричного складу і хімічного складу ільменіту. За даними обробки відібраних аналізів різними методами (графічними, аналітичними) вираховувались кількісні показники (коефіцієнти) гранулометричного і хімічного складу монофракції ільменіту, визначалась їх придатність для вирішення різних завдань.

Використання коефіцієнтів середнього розміру (Md) і сортованості (So) дозволили встановити ритмічність і цикли накопичення в долинних відкладах полтавської світи, які показують вісім різних типів розрізів. Натомість коефіцієнт змінності хімічного складу ільменіту тих же розрізів дозволяє виділити десять типів розрізів.

Ритмічність і циклічність накопичення, встановлені різні типи розрізів в долинних відкладах полтавської світи найбільше підтверджують вертикальну зональність ільменітових розсипів і враховуються під час вивчення горизонтальної зональності розсипів.

Використання Md дозволяє загалом ефективно проводити зонування давнього рельєфу і його окремих форм, особливо – деформованих пізнішими тектонічними рухами. На досліджених ділянках, первинний рельєф перетворений ними різною мірою. Аналіз горизонтального поля розподілу Md дозволяє чітко виділяти схили та елементи днища палеодолин, місця тектонічних інверсій у долинах сучасних річок.

Коефіцієнти сортованості бувають однакові у фракціях різної гранулометричної крупності, які утворюються в процесі осадової диференціації. Гранулометричний склад осадових утворень Іршанського розсипного поля часто упадає з кори вивітрювання кристалічних порід. Гранулометрична структура полтавських відкладів, що вміщують розсипи, показує їхню "зрілість". Сортованість відкладів не завжди узгоджується з палеорельєфом.

Показники сортованості можуть ефективно використовуватись під час реконструкцій давніх озерних басейнів, розширень у палеодолинах. На підняттях і схилах палеодолин відзначається погіршення сортованості. Тут за ізолініями коефіцієнта сортованості добре встановлюються форми давнього рельєфу, а також давні конседиментаційні структури.

Палеорельєф впливав на розподіл ільменіту за показниками його змінності, особливо за умов його контрастності. Вирівняний рельєф менше впливав на якісний склад ільменіту. Найбільш вивітрілий ільменіт накопичувався на ізометричних і видовжених ділянках давніх озерних басейнів, у центральних розширених частинах палеодолин.

Коефіцієнт *лейкоксен/ільменіт* показує значну вивітрілість пізньоолігоцен-середньоміоценових розсипів.

У давніх долинних відкладах часто спостерігається зменшення мінералогічного коефіцієнта, що спричинено винесенням лейкоксену. Разом лейкоксен та ільменіт накопичувалися на підвищеннях у давніх долинах і на давніх межиріччях. Мінералогічні коефіцієнти вказують на сильну вивітрілість відкладів.

На горизонтальну зональність розподілу корисного компонента більше впливали виходи на поверхню корінних тіл розсипів. Палеорельєф у цьому випадку проявлявся менше. Але у давніх долинах палеорельєф впливав на горизонтальний розподіл Md ільменіту більше. Неконтрастний, але з численними морфологічними "пастками", палеорельєф сприяв незначному переміщенню ільменіту практично без його розубожування і контролював накопичення його дрібних фракцій.

Зональність – це важлива особливість будови ільменітових розсипних родовищ близького зносу, до яких належать Іршанське розсипне поле Української розсипної субпровінції. Алгоритм вивчення зональності починається з вивчення співвідношення в просторі корінних і розсипних тіл. Вивчення монофракції ільменіту (її гранулометрії, хімічного складу) дозволяє дослідити вертикальну зональність у розсипах і виявити її типи. Винесені на карту палеорельєфу узагальнені показники вертикальної зональності і виходи корінних джерел дозволяють вивчати горизонтальну зональність ільменітових розсипів.

Вивчення зональності ільменітових розсипів мають наукове і практичне значення. Отримані результати використовуються в палеогеографії, палеогеоморфології, неотектоніці, геоінформаційному моделюванні.

Список використаних джерел

- Геологія і корисні копалини України. (2001). Атлас. Київ.
- Василенко, С.П. (2015) Геологічна будова, умови утворення та рудоносність Мотронівсько-Аннівського титан-цирконієвого розсипного родовища (Середнє Придніпров'я). Автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київ.
- Додатко, А.Д. (1976). Кори вивітрювання Українського щита: Автореф. дис. ... д-ра геол.-мінералог. наук. ИГФМ АН УССР. Киев.
- Дудрович, Е.Ю., Мухин, Ю.М. (1977). Закономерности изменения химического состава ильменита из россыпей севера Украины. Древние и погребенные россыпи СССР. Т. 1. Киев.
- Комлев, А.А. (1988). Мезокайнозойский долинный морфолитогенез северо-западной части Украинского щита и его влияние на образование россыпей. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.04. Киев.
- Комлев О.О. (2005). Историко-динамичні басейнові геоморфосистеми геоморфологічних формацій Українського щита. Автореф. дис. ... д-ра. геогр. наук: 11.00.04. Киев.
- Комлев, О.О., Жилкін, С.В. (2022). Мезозой-кайнозойський морфолито-генез Українського щита (в межах Іршанського розсипного поля). *Український географічний журнал*, 1 (117).
- Кравченко, О.А. (2016). Структурно-літологічна геолого-генетична модель Красновутського родовища титано-цирконієвих руд. Автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київ.
- Лисенко, О.А. (2017). Розсипні родовища України. Стан освоєння та перспективи нагромадження їхнього потенціалу. *Збірник наук. праць УкрДГРІ*, 3.
- Полканов, Ю.А., Цымбал, С.Н. (1987). Особенности вещественного состава титановых и титан-циркониевых россыпей Украины. *VIII Всесоюзное совещание по геологии россыпей. Тезисы докладов*. Киев.
- Проскурин, Г.П. (1984). Геологическое строение и вещественный состав руд апатит-ильменитового месторождения Чеповичского массива. Автореф. дис. ... канд. геол.-мінералог. наук. ИГФМ АН УССР. Киев.
- Проскурин, Г.П., Кононов, Ю.В., Лукиных, А.Д. (1987). Россыпеобразующие ильменитосодержащие формации коростенского комплекса Украинского щита. *VIII Всесоюзное совещание по геологии россыпей. тезисы докладов*. Киев.
- Ремезова, О.О. (2011). Розшаровані титанові інтрузивні габро Коростенського плутону (північно-західна частина Українського щита). Автореф. дис. ... д-ра геол. наук. Київ.
- Свівальнева, Т.В. (2014). Геологія та рудоносність Злобичського розсипного родовища ільменіту: Автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київ.
- Тарасенко, В.С., Бойко, Д.Д. (1983). Минералогические особенности титановых руд Коростенского плутона (Украинский щит). *Минер. журн.*, 5 (4).
- Цымбал, С.Н., Полканов, Ю.А. (1975). Минералогия титан-циркониевых россыпей Украины. Киев.
- Цымбал, С.Н. и др. (1977). Закономерности размещения и источники питания титановых и титан-циркониевых россыпей Украины. Древние и погребенные россыпи. Т. 1. Киев.

Швайберов, С.К. (1987). Титановые россыпи северо-западной части Украинского щита. *VIII Всесоюзное совещание по геологии россыпей. Тезисы докладов*. Киев.

Яременко, О.В. (2020). Геологічні умови формування та розробки Торчинського родовища апатит-ільменітових руд Українського щита. *Авто-реф. дис. ... канд. геол. наук*. Київ.

References

- Geology and minerals of Ukraine. (2001). Atlas. Kyiv. [in Ukrainian]
- Vasylenko, S.P. (2015) Geological structure, conditions of formation and ore content of Motronivsko-Anivske titanium-zircon placer deposit (Middle Prydniprovya). *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.)*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Dodopko A.D. (1976). Weathering crusts of the Ukrainian shield. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.)*. Kyiv. [in Russian]
- Dudrovich, E.Y., Mukhin, Y.M. (1977). Patterns of change in the chemical composition of ilmenite from placers of the North of Ukraine. Ancient and buried placers of the USSR. Kyiv. [in Russian]
- Komliev, O.O. (1988). Historical and dynamic basin geomorphosystems of geomorphological formations of the Ukrainian shield. *Extended abstract of Candidate's thesis (Geogr.):11.00.04*. Kyiv. [in Russian]
- Komliev O.O. (2005). Mesocainozoic valley morpholithogenesis and its influence on placer formation. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geogr.):11.00.04*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Komlev, O.O., Zhilkin, S.V. (2022). Mesozoic-Cenozoic morpholithogenesis of the Ukrainian Shield (within the Irshanskoye placer field). *Ukrainian Geographical Journal*, 1 (117).
- Kravchenko, O.A. (2016). Structural and lithological geological and genetic model of the Krasnovutskoye deposit of titanium-zircon ores. *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.)*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Lysenko, O.A. (2017). Placer deposits of Ukraine. The state of development and prospects for increasing their potential. *Collection of scientific works of UkrGRI*, 3. [in Ukrainian]

Polkanov, Yu.A., Tsymbal, S.N. (1987). Features of the material composition of titanium and titanium-zirconium placers of Ukraine. *Abstracts of VIII All-Union meeting on geology of placers*. Kyiv. [in Russian]

Proskurin, G.P. (1984). Geological structure and material composition of ores of the apatite-ilmenite deposit of the Chepovychi massif. *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.-Min.)*. IGFM of the USSR Academy of Sciences. Kyiv. [in Russian]

Proskurin, G.P., Kononov, Y.V., Lukinikh, A.D. (1987). Placer-forming ilmenite-bearing formations of the Korosten complex of the Ukrainian Shield. *Abstracts of VIII All-Union meeting on geology of placers*. Kyiv. [in Russian]

Remezova, O.O. (2011). Stratified titanium-bearing intrusives of the Korosten gabbro (northwestern part of the Ukrainian Shield). *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.)*. Kyiv. [in Ukrainian]

Svivalneva, T.V. (2014). Geology and ore content of the Zlobyske alluvial ilmenite deposit. *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.)*. Kyiv. [in Ukrainian]

Tarasenko, V.S., Boyko, D.D. (1983). Mineralogical features of titanium ores of the Korosten pluton (Ukrainian Shield). *Mineralogy*, 5 (4). [in Russian]

Tsymbal, S.N., Polkanov, Yu.A. (1975). Mineralogy of titanium-zirconium placers in Ukraine. Kiev. [in Russian]

Tsymbal, S.N. et al. (1977). Patterns of distribution and sources of power for titanium and titanium-zirconium placers in Ukraine. Ancient and buried placers. Vol. 1. Kiev. [in Russian]

Schweiberov, S.K. (1987). Titanium placers of the northwestern part of the Ukrainian shield. *Abstracts of VIII All-Union meeting on geology of placers*. Kyiv. [in Russian]

Yaremenko, O.V. (2020). Geological conditions of formation and development of the Torchynske deposit of apatite-ilmenite ores of the Ukrainian Shield. *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.)*. Kyiv. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 26.10.22

O. Komliev, Dr. Sci. (Geogr.), Prof.
e-mail: morpha2007@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Geography,
2 Ak. Glushkova Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

THE ZONALITY OF ILMENITE BATTERIES WITHIN THE BOUNDARIES OF THE IRSHAN BATTLE FIELD OF THE UKRAINIAN SHIELD

World-class titanium and titanium-zirconium placer deposits are located on the territory of Ukraine. They form Ukrainian sub-province of the placer province of Eastern Europe. It also includes the Irshansky placer field for the development of short-lived ilmenite placers. The article presents the results of research of the spatial ratio of placers and root sources, vertical and horizontal zonation of the material composition of placers on 9 detailed sections. This allows us to identify additional criteria for establishing the genesis of placers, which is important when conducting paleogeographic and paleogeomorphological work. The main sources of placers were mainly stratum bodies of various thicknesses, which were independent structures or were elements of the now destroyed domed structures of the foundation. The indigenous bodies and placers in the plan coincide completely, partially, or do not coincide. The criterion of coincidence of root and placer bodies indicates that the useful component from the root bodies to placers moved a distance of several hundred meters. Loose deposits contained in the sediments of the Poltava suite formation of the Late oligocene-Middle miocene age were eluvial, eluvial-deluvial, deluvial, deluvial-alluvial, proluvial and alluvial by genesis. Paleorelief was then favorable for the preservation of placers as the primary concentrations of the useful component of indigenous sources, and their enrichment. Ilmenite placers were then formed on all hypsometric levels of ancient relief, but the most significant of them are at the lower level (in the bottoms and on the slopes of ancient valleys). The results of analyzes of granulometric and chemical composition of monofraction of ilmenite placers, granulometric and material composition of sediment-containing placers, were studied in combination with other data (structural-tectonic, paleogeomorphological). Analyses of the material composition of placers and sediments were selected by interval testing of sections. Based on the results of their processing, quantitative indicators characterizing the particle size distribution and chemical composition of ilmenite were calculated. Their study made it possible to identify different types of sections in the deposits of the contribution of the Poltava suite formation (8 – according to granulometry, 10 – according to the change in the chemical composition of ilmenite), vertical and horizontal zonation, allowing solving various problems (paleogeomorphological reconstructions, to identify consedimentary structures, location detection tectonic inversions).

Keywords: ilmenite, ilmenite placers, root springs, zonation of placers, paleorelief.

УДК 553.3:543.6

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.11>Н. Баряцька, д-р геол. наук, голов. геолог
e-mail: BariatskaN@gmail.comС. Сергєєва, метролог
e-mail: sergeieva.svitlana@gmail.com
ТОВ "Геологічна сервісна компанія",
вул. Боричів Тік, 22а, м. Київ, 04070, Україна

ВИКОРИСТАННЯ КОНТРОЛЬНИХ ПРОБ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ (QA/QC)

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

Під час проведення геологорозвідувальних робіт якості даних, які лягають в основу оцінки ресурсів і запасів, надається надзвичайно важливе значення. Згідно з різними міжнародними регламентуючими документами та сучасною світовою передовою практикою, програми забезпечення і контролю якості (QA/QC) є необхідною частиною геологічної розвідки. Забезпечення якості (Quality Assurance – QA) використовується для запобігання проблемам з якістю, контроль якості (Quality Control – QC) спрямований на їхнє виявлення у випадку виникнення, і разом вони утворюють загальну систему якості – QA/QC. У статті розглядаються основні етапи історії розвитку QA/QC, яка бере свій початок у середньовіччі і триває в наш час.

У QA/QC аналітичних досліджень зазвичай використовуються контрольні проби різних типів та призначення: стандарти, холості проби підготовки, холості проби грубого матеріалу, холості аналітичні проби, польові дублікати, дублікати грубого матеріалу, аналітичні дублікати, а також зовнішній лабораторний контроль. Їхня кількість та співвідношення є основною темою даного дослідження. За опублікованими даними дев'яти різних авторів, рекомендована кількість контрольних проб кожного типу відрізняється, і в середньому кількість контрольних проб усіх типів становить близько 20 % від загальної кількості рядових проб.

Для висвітлення сучасного стану питання було проаналізовано 111 програм QA/QC по 87 рудних об'єктах за даними публічних звітів, розміщених емітентами біржі Торонто. Так, на практиці кількість контрольних проб не обов'язково досягає рекомендованих 20 % і сягає трохи більше 16 %.

Основні висновки щодо кількості та співвідношення контрольних проб можна сформулювати таким чином: (1) загалом спостерігається тенденція щодо збільшення кількості та різноманітності контрольних проб; (2) серед типів контрольних проб найчастіше використовуються так звані стандарти, а найменше – холості проби грубого матеріалу; (3) кількість та різноманітність контрольних проб також залежить від типу корисної копалини; (4) на більш пізніх геологорозвідувальних стадіях об'єкта відносна кількість контрольних проб зазвичай збільшується, але в окремих випадках може зменшуватись за умови задовільних результатів на попередніх стадіях, а також незмінності методики робіт і лабораторії.

Ключові слова: забезпечення і контроль якості, QA/QC, контрольні проби.

Вступ. У сучасних реаліях гарантія якості геологічних даних є необхідною умовою розвитку об'єктів геологорозвідувальної та видобувної галузі. Наразі небагато компаній, які займаються розвідкою і видобуванням корисних копалин, мають чітку і систематичну політику забезпечення якості.

М. Валле (Vallee, 1998) визначає три основних підходи: "невтручання", "улов як улов" і систематичний контроль якості, причому останній зустрічається дуже рідко. На його думку, з кінця 80-х років ця ситуація суттєво не поліпшилася. Результати численних аудитів і комплексних перевірок проєктів з розвідки і видобування корисних копалин в Південній і Північній Америці, Азії, Африці та Європі (більшість з яких управляються північноамериканськими і австралійськими компаніями) показали, що комплексні програми геологічного контролю якості все ще виконуються відносно нечасто.

У результаті значного поширення процедур гарантії якості компанії дедалі частіше зацікавлені в реалізації таких програм, особливо за потреби державного фінансування. Але для керівництва проєкту реалізація програми контролю якості включає в себе певні "небажані" зміни бюджету розвідки. Крім того, це потребує поліпшеної організації опробування, підготовки бази даних і обробки даних, динамічних відношень співробітництва з лабораторіями, а також відповідної підготовки геологічного персоналу.

Основні визначення. Забезпечення якості (Quality Assurance – QA) – комплекс заходів, що гарантує необхідну якість робіт. Контроль якості (Quality Control – QC) – система методів, процедур, перевірок для отримання і підтвердження потрібної якості. Отже, QA використовується для запобігання проблемам, QC спрямований на їхнє виявлення у випадку виникнення, і разом вони утворюють загальну систему якості – QA/QC (рис. 1).

Історія розвитку QA/QC (рис. 2). В Європі в кінці XIII ст. майстри почали об'єднуватися в гільдії, в яких діяли суворі правила щодо якості продуктів і послуг. На товари, що випускаються, ставились позначки, які були доказом якості для клієнтів усієї середньовічної Європи. Такий алгоритм називався "моделлю майстерності" (craftsmanship model) і зберігся аж до початку XIX ст. Фабрична система з упором на інспекцію продукції зародилася в середині 1750-х рр. у Великій Британії. В Америці наприкінці XIX ст. на підприємствах, де в основному використовувалась система управління, розроблена Федеріком Тейлором, задля уникнення потрапляння дефектної продукції до покупців почали створювати спеціальні інспекторські відділи.

У середині 1920-х рр. доктор У. Едвардс Демінг уперше ввів поняття сучасного контролю якості, відоме як принцип (або цикл) Демінга–Шухарта (PDCA – Plan-Do-Check-Act) – планування-дія-перевірка-коригування. Його соратник Уолтер Шухарт зосередився не лише на готовому продукті, але й на промислових процесах, для контролю якості яких запропонував використовувати статистичний контроль якості (statistical quality control – SQC) і контрольні діаграми. У 1926 р. в Нью-Йорку почала функціонувати Міжнародна федерація національних асоціацій зі стандартизації (International Federation of National Standardizing Associations – ISA).

Під час Другої світової війни у воєнному виробництві якість стала критично важливою. Збройні сили почали використовувати вибіркового контроль, таблиці відбору проб було опубліковано у вигляді воєнного стандарту Mil-Std-105. У 1944 р. було утворено Координаційний комітет ООН зі стандартизації (United Nations Standards Coordinating Committee – UNSCC).



Рис. 1. Співвідношення забезпечення і контролю якості

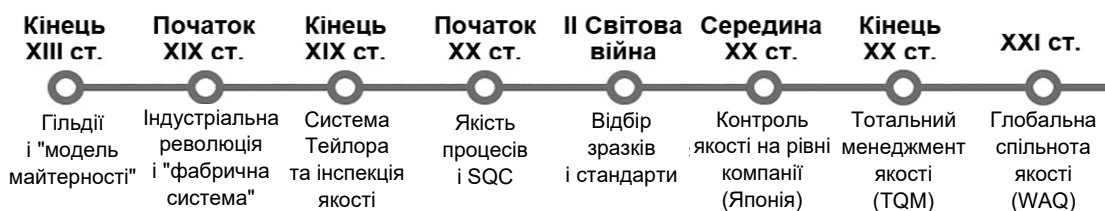


Рис. 2. Хронологічна шкала розвитку QA/QC (*The history of quality, n.d.*)

У 1947 р. в результаті об'єднання ISA і UNSCC, до складу яких на той час входило 25 країн, було створено Міжнародну організацію зі стандартизації (International Organization for Standardisation – ISO).

Після Другої світової війни, коли основні японські виробники перейшли з виробництва військової продукції на товари цивільного призначення, в Японії поширився підхід загального контролю якості на рівні компанії (Company-wide Quality Control). Він полягав у поліпшенні всіх організаційних і виробничих процесів за допомогою людей, які їх виконували.

Загальне управління якістю (Total Quality Management) у США стало прямою відповіддю на якісну революцію в Японії після Другої світової війни і було зумовлено конкуренцією в галузі якості виробництва. Директори великих корпорацій опікувалися не лише контролем, але й управлінням якістю.

Наразі до складу ISO входить 165 країн, розроблено 24 115 міжнародних стандартів, які охоплюють практично всі аспекти діяльності. Стандарти серії ISO 9000, що створені для вдосконалення систем менеджменту якості, прийняті більш ніж 190 країнами світу, вони можуть застосовуватися до будь-яких підприємств, незалежно від їхнього розміру, форм власності і галузі діяльності. Відповідність вимогам ISO 9001:2015 "Вимоги до систем менеджменту якості" (Quality Management Systems – Requirements), основними принципами якого є контроль достовірності і контроль якості, свідчить про рівень надійності компанії.

QA/QC для геологорозвідувальних робіт. Згідно з рекомендаціями Канадського інституту гірничої справи – CIM (*CIM Estimation...*, 2019), QA/QC необхідно враховувати під час збору, обробки та зберігання будь-яких даних, які зрештою використовуються для оцінки мінеральних ресурсів. Ця програма має бути пов'язана, окрім іншого, з перевіркою даних, виходом керну, розміром вибірки, пробопідготовкою, аналітичними методами, використанням контрольних проб, ефектами багатократних періодів збору даних і узгодженістю тривимірної інтерпретації. Результати програми QA/QC є частиною бази даних і повинні бути зареєстровані (*Баряцкая, Сафронова, 2019*).

Під час проведення геологорозвідувальних робіт якості даних, які лягають в основу оцінки ресурсів і запасів, завжди надавалося важливе значення. Однак до певного часу вимоги до якості таких даних не регламентувалося жодними документами.

У 1989 р. вийшло перше видання Кодексу JORC, а слідом за ним і інших – CME, CIM, SAMREC, PERC, NI 43-101 та ін. Своєрідним каталізатором послугував великий біржовий скандал, пов'язаний з аферою компанії Bre-X Minerals Ltd., яка виконувала геологічну розвідку золотого проєкту Бусанга в Індонезії (*Casey, 2019*).

Недовіра до класифікації ресурсів, яка виникла внаслідок цього, призвела до більш широкого використання процедур забезпечення якості (QA) і контролю якості (QC) у програмах розвідки корисних копалин. Австралійська фондова біржа (ASX) та інші біржі тепер потребують публікувати дані, які супроводжуються описом процедур опробування і QA/QC, що використовуються під час збору та аналізу розвідувальних проб. Компетентна / кваліфікована особа (competent person – CP, qualified person – QP) повинна описати характер прийнятих процедур контролю якості, включаючи типи та кількість контрольних проб, і вказати, чи досягнутий прийнятний рівень точності і прецизійності.

Фінансові установи тепер вимагають неупередженого аудиту геологічних і аналітичних даних, що зазвичай містять докладний огляд процедур QA/QC, які проводяться під час розвідки, включаючи підтвердження точності і прецизійності. Позитивним результатом аудиту QA/QC є "штамп затвердження" бази даних, без якого всі зусилля, витрачені на геологічне моделювання і класифікацію ресурсів, ставляться під сумнів. Погана практика QA/QC призводить до отримання оцінок ресурсів "у темряві" (in the dark).

Програми QA/QC розробляються перед початком робіт і дозволяють оцінити ступінь достовірності даних геологічного проєкту на будь-якій стадії робіт. Метою таких програм є кількісна оцінка і моніторинг будь-яких можливих помилок, а також надання інформації, яка може бути використана для оптимізації процедур відбору проб і аналізу з метою мінімізації кількості помилок.

Типи контрольних проб та їхні функції. Ефективна програма QA/QC – це програма, яка є активною, безперервною і переглядається протягом усього процесу збору даних, дозволяючи виконувати корегувальні дії на буровій, у процедурах опробування або в лабораторії. Процедури контролю якості необхідні для моніторингу

контамінації (contamination), прецизійності (precision), точності (accuracy), похибки (bias) і зазвичай включають використання різних типів контрольних проб для досягнення цієї мети (Abzalov, 2008). У табл. 1 розглядаються основні типи контрольних проб, мету їхнього застосування та критерії відповідності.

Таблиця 1

Типи контрольних проб				
Скорочення	Тип контрольної проби	Короткий опис	Мета (ціль) застосування	Критерії відповідності
SRM	Стандартний зразок або стандарт (Standard, Certified Reference Material)	Сертифікований матеріал відомого складу	Моніторинг якості аналізу (відтворності і правильності результатів виміру)	Приймається в межах $\pm 2-3$ абс. стандартних відхилень (SD) від сертифікованого значення
FB (PB)	Холоста проба підготовки або холоста польова проба (Preparation Blank, Field Blank)	Не сертифікована проба з матеріалу об'єкта досліджень, яка не містить компонент, що визначається	Моніторинг можливого забруднення проб у ході лабораторних процедур, а саме: пробопідготовки, аналізу, маркування	Приймається в діапазоні від 2–3 до 5 – нижньої межі виміру (LLD) лабораторної методики
CB	Холоста проба грубого матеріалу (Coarse Blank)	Проба матеріалу стадії дроблення, яка не містить компонент, що визначається	Контролює можливе забруднення в процесі дроблення і розколювання	Те саме
AB	Холоста аналітична проба (Certified Reference Blank, Analytical Blank)	Сертифікований дотертий матеріал, який не містить компонент, що визначається	Виявлення фонових або внесеного забруднення в процесі аналізу	Те саме
FD	Польовий дублікат (Field Duplicate)	Проба, відібрана одночасно з основною з другої половини (або чверті) керну до її дроблення	Оцінка репрезентативності проби та методики опробування (у т.ч. виміру)	Приймається в межах 30 % відносної розбіжності
CD	Дублікат грубого матеріалу (Coarse Duplicate)	Проба, відібрана із залишків дроблення основної аналітичної проби (зазвичай, крупність 2 мм) перед розтиранням	Перевірка якості пробопідготовки і відтворності лабораторного аналізу	Приймається в межах 20 % відносної розбіжності
AD	Аналітичний дублікат (Pulp Duplicate, Analytical Duplicate, Fine Duplicate)	Проба, відібрана із залишків дотертого матеріалу основної аналітичної проби (крупність 140–200 меш)	Виявлення випадкових похибок аналізу проб шляхом оцінки відтворності результатів виміру	Приймається в межах 10 % відносної розбіжності
UL	Зовнішній контроль (Independent / External Control, Umpire / Third-party Laboratory Control)	Аналіз дублікатів аналітичних проб, які пройшли внутрішній контроль, незалежною лабораторією, здійснений тим же методом	Оцінювання значущості систематичної розбіжності результатів виміру основної лабораторії	Оцінка здійснюється за допомогою критерію Стьюдента

Головною вимогою до оцінки мінеральних ресурсів за міжнародними стандартами є якість геологорозвідки і результатів аналітичних досліджень, яку ефективно забезпечують програми QA/QC. Чинні міжнародні стандарти та сучасна передова практика потребують, щоб QA/QC супроводжувала будь-яку геологорозвідувальну програму для підтвердження достовірності даних розвідки. Програма QA/QC спрямована моніторити всі принципові аспекти послідовності опробування з метою контролю і зменшення кількості випадкових і систематичних помилок. Міжнародна сертифікована лабораторія, у свою чергу, здійснює систематичний контроль усіх етапів проходження проб, використовуючи свої контрольні проби за аналогічною схемою. Обробка результатів внутрішнього лабораторного контролю здійснюється після проходження кожної партії проб, на відміну від вітчизняних лабораторій, де контроль проводиться поквартально.

Кількість дублікатів, стандартів і холостих проб може варіюватися в програмах QA/QC залежно від типу мінералізації, процедур тощо. Так, для крупного золота кількість холостих проб пробопідготовки збільшують, оскільки це критичний етап для даного типу зруденіння. У деяких випадках кількість таких холостих проб може зменшуватися у наступних партіях проб за умови отримання позитивних результатів у перших партіях.

Контрольні проби повинні включатися у послідовність проб таким чином, щоб у кожній лабораторній партії був присутній хоча б один рудний стандарт, одна холоста проба, один бідний стандарт і один дублікат.

Частота включення контрольних проб залежить від особливостей корисної копалини і ступеня вивченості об'єкта, їх розподіляють у партіях проб таким чином, щоб вони якомога частіше потрапляли у мінералізовані інтервали. Бажано холосту пробу вставляти після мінералізованого інтервалу. Рекомендована кількість контрольних проб кожного типу відрізняється також у різних авторів залежно від їхнього досвіду (табл. 2), і в середньому кількість контрольних проб усіх типів становить близько 20 % від загальної кількості рядових проб.

Для висвітлення сучасного стану питання, автори статті виконали аналіз 111 програм QA/QC по 87 рудних об'єктах за даними звітів, опублікованих у 2021 р. на офіційному сайті Sedar (SEDAR, n.d.) – файлової системи, що забезпечує публічний доступ до інформації, поданої емітентами біржі Торонто. Необхідно розуміти, що у цю статистику потрапили лише об'єкти із задовільними програмами QA/QC, які пройшли незалежний аудит при виході на біржу. Приклади наведено в табл. 3.

Середнє співвідношення контрольних проб різних типів у реальних програмах QA/QC показано на рис. 3.

Таблиця 2

Частота включення (залучення) контрольних проб за рекомендаціями різних авторів
(згідно з (Simon Mendez, 2011), з доповненнями)

Автор, джерело	Опис	Рекомендована кількість контрольних проб
R.S. Rogers (Rogers, 1998)]	Дублікати, стандарти, холості проби: 1:20; зовнішній контроль: 5 %	~ 20 %
I. Neuss (Neuss, 1998)	2–5 % польових дублікатів, 2–5 % дублікатів грубого матеріалу, 5 %–10 % аналітичних дублікатів, 5–10 % зовнішнього контролю; 1 стандарт і 1 холоста аналітична проба на кожну партію	от 19 % до 25 %
S. Long (Long, 1998; 2000)	5 % дублікатів грубого матеріалу, 5 % аналітичних дублікатів, 5 % стандартів, одна аналітична холоста проба на партію (близько 3 %), 3 % зовнішнього контролю (з матеріалу аналітичних дублікатів)	~ 21 %
D. Sketchley (Sketchley, 1999)	На партію з 20 проб: 1 холоста проба, 1 стандарт, 1 дублікат; крім того, усі аналітичні дублікати слід проаналізувати в контрольній лабораторії	~ 20 %
L. Bloom (Bloom, 1999)	На партію з 20 проб: 1 холоста проба, 1 стандарт; крім того, відправка кожної десятої дотертої проби у незалежну лабораторію	~ 20 %
S. Lomas (Lomas, 2004)	На партію з 20 проб: 1 холоста проба, 1 стандарт, 1 дублікат грубого матеріалу і 1 аналітичний дублікат; крім того, 5 % дотертих проб слід проаналізувати в контрольній лабораторії (включаючи стандарти)	~ 25 %
A. Simon Mendez (Simon Mendez, 2011)	Дублікати – 6 % (польових дублікатів – 2 %, дублікатів грубого матеріалу – 2 %, аналітичних дублікатів – 2 %), стандарти – 6 %, холості проби – 4 % (холості проби грубого матеріалу – 2 %, аналітичні холості проби – 2 %), зовнішній контроль – 4 %	~ 20 %
O. Альмендінгер (Альмендінгер, 2018)	Дублікати: польові – 2–5 %, грубого матеріалу – 2–5 %, аналітичні – 5 %; стандарти – 5–6 %, холості проби: польові – 2 %, аналітичні – 2 %; зовнішній контроль – 5 %	не менше 20 %
S Dominy (Dominy et al., 2020)	Польові дублікати – 1:20, дублікати грубого матеріалу – 1:20, аналітичні дублікати – 1:20, стандарти – 1:20, холості проби – 1:20, зовнішній контроль – 1:20	до 30 % (максимальний варіант)

Таблиця 3

Кількість контрольних проб за програмами QA/QC реальних рудних об'єктів

Назва об'єкта (родовища)	Корисний компонент	Країна	Кількість контрольних проб	
			за типами	загальна
Malartic Mine 100	Au	Канада	SRM – 1:20, CD – 1:25, CB – 1:25, AB – 1:50, UL – 1:20	20 %
El Roble Mine	Au-Cu	Колумбія	Кернові проби: SRM – 1:16, FD – 1:25, FB + AB = 1:12, UL – 1:18 Бороздові проби: SRM – 1:25, FD – 1:16, FB + AB = 1:20, UL – 1:8	24,1 % 27,8 %
Embayment	Co	Канада	SRM – 1:24, FD – 1:28, AB + PB – 1:40	10,2 %
Blanco	Li	Чилі	SRM – 7 %, FD – 14 %, AB – 4 %, UL – 2 %	27 %
Kato	Au-Ag	Японія	SRM – 1:35, FD – 1:35, AD – 1:35, AB – 1:35	8,6 %
La Libertad	Au-Ag-Cu	Нікарагуа	SRM – 1:39, FD – 1:39, CD – 1:39, AD – 1:39, AB – 1:39, UL – 3,6 %	16,4 %
Toropunto, Emmanuel, Maria Cecilia	Au-Ag-Cu-Mo	Перу	SRM – 4,1 %, FD – 2,7 %, CD – 2,7 %, AD – 4 %, CB – 2,7 %, AB – 2,7 %, UL – 1,44 %	20,3 %
Entrée/Oyu Tolgoi JV	Cu-Au-Mo	Монголія	SRM – 1:20, FD – 1:40, CD – 1:40, AD – 1:20, PB – 1:20, UL – 5 %	25 %
Mercedes	Au-Ag	Мексика	SRM – 3,9 %, FD – 1:30, AB – 0,4 %, PB – 2,3 %, UL – 1:30	13,3 %
Rovina Valley	Au-Cu	Румунія	Au: SRM – 3,4 %, FD – 3 %, CD – 2,6 %, AD – 3 %, CB – 3 %, AB – 3 % Cu: SRM – 2,2 %, FD – 3 %, CD – 2,6 %, AD – 3 %, CB – 3 %, AB – 3 %	18 % 16,8 %
Elmtree Gold	Au-Ag	Канада	SRM – 1:35, FD – 1:40, AD – 1:25, PB – 1:20, UL – 1:25	22,4 %
Mt Cattlin	Li-Ta	Австралія	SRM – 1:25, FD – 1:25, CB + AB – 1:25	12 %
Kgwakgwe Hill	Mn	Ботсвана	SRM – 6,9 %, FD – 1,3 %, AD – 1,2 %, AB – 3,75 %, UL – 2,5 %	15,7 %
Baptiste	Ni-Fe-Au-Cr	Канада	SRM – 9,8 %, AB – 3,47 %, UL – 4.54	17,8 %
Kaukua	Pd, Pt, Au, Cu, Ni	Фінляндія	SRM – 2,8 %, AB + FB – 1,5 %, UL – 11,07 %	15,4 %
Florida Canyon	Zn-Pb-Ag-Cu	Перу	SRM – 4,92 %, FD – 0,93 %, CD – 0,93 %, AD – 4,93 %, CB – 1,95 %, UL – 2,21 %	15,87 %
Zebediela	Ni	ПАР	SRM – 1:30, FD – 1:30, AB – 1:30, UL – 4,9 %	~15,6 %
Zacatecas	Ag-Au-кольорові метали	Мексика	SRM 1:16, AD – 1:16, PB – 1:16	~18,9 %
Canadian Malartic	Au-Ag	Канада	Regional Exploration 2014–2020: SRM – 5,2 %, AD – 2,3 %, AB – 2,6 %, UL – 5,3 %	15,4 %
			Mine Exploration 2017–2018: SRM – 5,4 %, AD – 2,4 %, AB – 2,6 %, UL – 3,2 %	13,6 %
			Mine Exploration 2019–2020: SRM – 5,4 %, AD – 2,4 %, AB – 2,4 %, UL – 1,2 %	11,4 %
Casino	Cu-Au-Mo	Канада	2019: SRM – 5 %, FD – 5 %, AB – 5 %, UL – 20 % 2020: SRM – 5 %, FD – 5 %, AB – 5 %, UL – 5 %	35 % 20 %
Kiena Mine	Au	Канада	SRM – 5,9 %, FD – 5,1 %, AD – 5,1 %, PB – 5,6 %, UL – 3,9 %	25,6 %

*SRM (standard reference materials) – стандарти, FD (field duplicates) – польові дублікати, CD (coarse duplicates) – дублікати грубого матеріалу, AD (analytical duplicates) – аналітичні дублікати, FB (field blanks) – польові холості проби, CB (coarse blanks) – холості проби грубого матеріалу, PB (preparation blanks) – холості проби пробопідготовки, AB (analytical blanks) – аналітичні холості проби, UL (umpire laboratory) – зовнішній контроль.



Рис. 3. Середнє співвідношення контрольних проб у програмах QA/QC

Аналіз показав, що на практиці кількість контрольних проб не обов'язково досягає рекомендованих 20 % і залежить від багатьох факторів (не завжди об'єктивних). У середньому кількість контрольних проб за 111 програмах QA/QC становило трохи більше 16 %.

Висновки. Основні висновки щодо кількості та співвідношення контрольних проб, що впливають з аналізу програм QA/QC (з опублікованих даних та реальних рудних об'єктів), можна сформулювати таким чином:

- загалом спостерігається тенденція щодо збільшення кількості та різноманітності контрольних проб – вважається, що це підвищує надійність результатів;
- серед типів контрольних проб найчастіше використовуються так звані стандарти, а найменше – холості проби грубого матеріалу;
- кількість та різноманітність контрольних проб також залежить від типу корисної копалини – чим складніше об'єкт, тим більше контрольних проб необхідно;
- на більш пізніх геологорозвідувальних стадіях об'єкта відносна кількість контрольних проб зазвичай збільшується, але в окремих випадках може зменшуватись за умови задовільних результатів на попередніх стадіях, а також незмінності методики робіт і лабораторії.

Список використаних джерел

- Альмендингер, О. (2018). Программа обеспечения и контроля качества QA/QC. <https://www.micromine.ru/qa-qc-quality-control/>
- Баряцкая, Н.В., Сафронова, Н.Г. (2019). Поэтапная проверка при трехмерном моделировании и оценке ресурсов рудных месторождений. *Геоинформатика*, 1 (69), 47–57.
- Abzalov, M.Z. (2008). Quality control of assay data: a review of procedures for measuring and monitoring precision and accuracy. *Exploration and Mining Geology*, 3–4 (17), 131–144.
- Bloom, L. (1999). The role of economic geologists in evaluating assay data quality.
- Casey, J.P. (2019). Mining scandals: four incidents that shook the industry. <https://www.mining-technology.com/features/mining-scandals-four-incidents-that-shook-the-industry/>
- CIM Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves. Best Practice Guidelines. (2019). Quebec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 75 p.
- Dominy, S., Purevgerel, S., Esbensen, K. (2020). Quality and sampling error quantification for gold mineral resource estimation. *Spectroscopy Europe*, 32 (6), 21–27.
- Lomas, S. (2004). QAQC Program. General Discussion. *AMEC Internal document*.
- Long, S. (1998). Practical Quality Control Procedures in Mineral Inventory Estimation. *Exploration and Mining Geology*, 7 (1 and 2), 117–127.
- Long, S. (2000). Assay Quality Assurance-Quality Control Program for Drilling Projects at the Prefeasibility to Feasibility Report Level (3rd. Ed.). *MRDI, Internal report*.
- Neuss, I. (1998). Sampling "Legends"-What Can We Learn from Busang? *More Meaningful Sampling in the Mining Industry. Australian Institute of Geoscientists*, 2, 109–118.
- Rogers, R.S. (1998). Forensic Geology and Mineral Exploration Projects. *Exploration and Mining Geology*, 7 (1 and 2), 25–27.
- SEDAR: System for Electronic Document Analysis and Retrieval, Canadian Securities Administration. (n.d.). <https://www.sedar.com/>

- Simon Méndez, A. (2011) Discussion on Current Quality-Control Practices in Mineral Exploration. *Applications and Experiences of Quality Control*, 595–610.
- Sketchley, D. (1999). Case history guidelines for establishing sampling protocols and monitoring quality control. *Proceedings of CIMM Annual General Meeting Symposium on Quality Control of Resource Estimations: an ISO Perspective*.
- Simyn, A. (2007). Control Sample Insertion Rate: Is There an Industry Standard? *Program and Abstracts of the 23rd International Applied Geochemistry Symposium (IAGS), Oviedo, Spain, 14–19 June 2007, The Association of Applied Geochemistry, Oviedo*.
- The history of quality. (n.d.). <https://asq.org/quality-resources/history-of-quality#development>
- Vallee, M. (1998). Sampling quality control. *Exploration and Mining Geology*, 7, 107–116.

References

- Abzalov, M.Z. (2008). Quality control of assay data: a review of procedures for measuring and monitoring precision and accuracy. *Exploration and Mining Geology*, 3–4 (17), 131–144.
- Allmendinger, O. (2018). Quality assurance and quality control programme QA/QC. <https://www.micromine.ru/qa-qc-quality-control/> [in Russian]
- Bariatska, N., Safronova, N. (2019) Stage-by-Stage Verification for Three-Dimensional Modeling and Resource Assessment of ore Deposits. *Geoинформатика*, 1(69), 47–57. [in Russian]
- Bloom, L. (1999). The role of economic geologists in evaluating assay data quality.
- Casey, J.P. (2019). Mining scandals: four incidents that shook the industry. <https://www.mining-technology.com/features/mining-scandals-four-incidents-that-shook-the-industry/>
- CIM Estimation of Mineral Resources and Mineral Reserves. Best Practice Guidelines. (2019). Quebec: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 75 p.
- Dominy, S., Purevgerel, S., Esbensen, K. (2020). Quality and sampling error quantification for gold mineral resource estimation. *Spectroscopy Europe*, 32 (6), 21–27.
- Lomas, S. (2004). QAQC Program. General Discussion. *AMEC Internal document*.
- Long, S. (1998). Practical Quality Control Procedures in Mineral Inventory Estimation. *Exploration and Mining Geology*, 7 (1 and 2), 117–127.
- Long, S. (2000). Assay Quality Assurance-Quality Control Program for Drilling Projects at the Prefeasibility to Feasibility Report Level (3rd. Ed.). *MRDI, Internal report*.
- Neuss, I. (1998). Sampling "Legends"-What Can We Learn from Busang? *More Meaningful Sampling in the Mining Industry. Australian Institute of Geoscientists*, 2, 109–118.
- Rogers, R.S. (1998). Forensic Geology and Mineral Exploration Projects. *Exploration and Mining Geology*, 7 (1 and 2), 25–27.
- SEDAR: System for Electronic Document Analysis and Retrieval, Canadian Securities Administration. (n.d.). <https://www.sedar.com/>
- Simon Méndez, A. (2011) Discussion on Current Quality-Control Practices in Mineral Exploration. *Applications and Experiences of Quality Control*, 595–610.
- Simyn, A. (2007). Control Sample Insertion Rate: Is There an Industry Standard? *Program and Abstracts of the 23rd International Applied Geochemistry Symposium (IAGS), Oviedo, Spain, 14–19 June 2007, The Association of Applied Geochemistry, Oviedo*.
- Sketchley, D. (1999). Case history guidelines for establishing sampling protocols and monitoring quality control. *Proceedings of CIMM Annual General Meeting Symposium on Quality Control of Resource Estimations: an ISO Perspective*.
- The history of quality. (n.d.). <https://asq.org/quality-resources/history-of-quality#development>
- Vallee, M. (1998). Sampling quality control. *Exploration and Mining Geology*, 7, 107–116.

Надійшла до редколегії 07.10.22

N. Bariatska, Dr. Sci. (Geol.), Chief Geologist
e-mail: BariatskaN@gmail.com

S. Sergeieva, metrologist
e-mail: sergeieva.svitlana@gmail.com
Geological Service Company LLC,
22a Borychiv Tik Str., Kyiv, 04070, Ukraine

CONTROL SAMPLES USING FOR QUALITY ASSURANCE AND CONTROL (QA/QC)

In geological exploration, the quality of the data underlying of resource and reserve estimation is critically important. According to various international regulations and current world best practices, Quality Assurance and Quality Control (QA/QC) programs are a necessary part of geological exploration. Quality Assurance (QA) is used to avoid the problems with quality, Quality Control (QC) is aimed at detecting them in case of their occurrence, and together they form the overall Quality System – QA/QC. The article considers the main stages of the history of QA/QC development, which begins in the Middle Ages and continues in our time.

Control samples used to control analytical tests have different types and purposes / functions: standards, preparation blanks, coarse blanks, analytical blanks, field duplicates, coarse duplicates, pulp duplicates and umpire laboratory control. Their amount and ratio is the main topic of the research. According to the published data of nine different authors, the recommended control sample amount of each type is different. On average, the amount of control samples of all types is about 20% of the total number of routine samples.

In order to highlight the current state of the issue, the authors of the article have analyzed 111 QA/QC programs for 87 ore projects according to the public reports disclosed by the issuers of the Toronto Stock Exchange. So, in practice, the control sample amount does not necessarily reach the recommended 20 % and is slightly more than 16 %.

The main conclusions regarding the amount and ratio of control samples can be presented as follows: (1) the general increasing trend in the amount and variety of control samples is observed; (2) among the control sample types, the so-called standards are most often used, and the least used are coarse blanks; (3) the control sample amount and variety also depends on the mineral type; (4) at more advanced exploration stages of the project, the control sample relative number usually increases, but in some cases it may decrease if the results of the previous stages are satisfactory, and the methodology and laboratory are not changed.

Keywords: Quality Assurance, Quality Control, QA/QC, control samples.

УДК 550.4:574.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.12>

В. Верховцев, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: verkhovtsev@ukr.net

К. Сушук, канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.,
e-mail: IGNS_Sushchuk@nas.gov.ua

Ю. Тищенко, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: u-risk@ukr.net

С. Мещеряков, пров. інж.
e-mail: IGNS_Meshcheriakov@nas.gov.ua
ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України",
просп. Академіка Палладіна, 34а, м. Київ, 03142, Україна;

І. Колябіна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
e-mail: IGNS_Koliabina@nas.gov.ua;
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55б, м. Київ, 01054, Україна

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ДОБУВАННЯ УРАНУ СПОСОБОМ ПІДЗЕМНОГО СВЕРДЛОВИННОГО ВИЛУГОВУВАННЯ (НА ПРИКЛАДІ МИХАЙЛІВСЬКОГО ПОЛІГЕННОГО РОДОВИЩА)

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

Ядерна енергетика є важливою складовою національної безпеки України. Забезпечення цієї галузі власними сировинними ресурсами – одне з пріоритетних перспективних завдань держави. Одним із напрямів успішного вирішення цього завдання є створення сприятливого інвестиційного клімату для залучення приватних суб'єктів господарювання у розвиток вітчизняної видобувної галузі.

В Україні розвідані численні родовища урану, які характеризуються відносно незначними запасами, у зв'язку з чим до недавнього часу не вважалися перспективними для відпрацювання державною видобувною компанією "Східний гірничо-збагачувальний комбінат" (м. Жовті Води). Ці родовища не є рентабельними для розробки традиційними методами – шахтним чи кар'єрним, однак можуть бути відпрацьовані більш дешевим методом підземного свердловинного вилуговування, який не передбачає розкриття горизонтів геологічних порід. У разі правильної організації експлуатаційних та відновлювальних робіт існує реальна можливість суттєвого зниження негативних наслідків для довкілля.

Висвітлено деякі аспекти узагальнених результатів аналізу впливу на довкілля нової діяльності, що передбачає створення приватного підприємства з дослідно-промислової розробки та подальшого видобування урану на Михайлівському родовищі в Казанківському районі Миколаївської області, які стосуються оцінки вибору технології вилучення корисної копалини методом підземного свердловинного вилуговування. Проектоване підприємство буде складатися з кількох тимчасових видобувних ділянок та стаціонарного промайданчика переробного комплексу, а також об'єктів інженерно-транспортної інфраструктури. Після відпрацювання родовища буде проведена рекультивація земель і їх повернення землекористувачам та реабілітація надр, яка забезпечить їх відновлення до передпроектного стану.

На території, яка може бути зачеплена будівництвом та експлуатацією планованого підприємства, проведено натурні польові та лабораторні геоекологічні вишукування та описано їх результати.

Ключові слова: уран, Михайлівське родовище, підземне свердловинне вилуговування, надра, вплив, довкілля, технологічні розчини, кристалічні породи, осадові породи, водоносні горизонти.

Вступ. В урановій промисловості України та інших країн світу виконано багато теоретичних і практичних досліджень для ефективного вилучення урану і деяких супутніх металів на місці залягання руд ("in situ leaching"). Підземне свердловинне вилуговування (ПСВ) з подальшим вилученням цінних компонентів з продуктивних розчинів відкриває широкі можливості для відпрацювання комплексних руд.

Міжнародне агентство з атомної енергії (МАГАТЕ) визнає цю технологію екологічно найчистішим і найбезпечнішим способом видобутку корисних копалин, який не потребує значних витрат на рекультивацію. Видобутий вказаним методом уран належить до найнижчої цінової категорії (Мамілов і др., 1980).

Хоча метод ПСВ урану застосовується переважно для відпрацювання родовищ з невеликим вмістом урану в осадових товщах, здійснюються спроби застосування ПСВ у кристалічних масивах як менш витратного і екологічно шкідливого, порівняно з шахтним або кар'єрним (Лавєрова, 1998; Мамілов і др., 1980; Макаренко та ін., 2005; Олейник і др., 1982; Подземное и кучное выщелачивание..., 2005; Шумлянський та ін., 2007).

Наукова проблематика, пов'язана з подальшою розробкою методу ПСВ щодо родовищ різного типу та в різних геологічних умовах, полягає в необхідності проведення досліджень екологічних наслідків вказаної діяльності.

Метою статті є визначення оптимальних шляхів застосування методу ПСВ для відпрацювання Михайлівського родовища урану з урахуванням особливостей його геологічної будови та вимог щодо зниження негативних екологічних наслідків для підземних водоносних горизонтів та довкілля в цілому.

Короткий опис методу ПСВ. На сьогодні ще не існує загальноприйнятої геотехнологічної систематизації уранових родовищ. У спеціальній літературі наводяться різні класифікації родовищ урану для видобування способом ПСВ, у яких враховуються умови утворення, морфологія і розміри рудних покладів, літолого-фаціальні, геохімічні особливості руд і рудовмісних порід, гідрогеологічні умови тощо (Мамілов і др., 1980).

Численними дослідженнями доведено, що видобування урану методом ПСВ значно переважає традиційні гірничі способи і за рентабельністю, і за можливістю пом'якшення екологічних наслідків (Лавєрова, 1998; Мамілов і др., 1980; Макаренко та ін., 2005; Олейник і др., 1982; Подземное и кучное выщелачивание..., 2005; Шумлянський та ін., 2007).

Зокрема, у монографії (Шумлянський та ін., 2007) наведено комп'ютерні моделі фізико-хімічних процесів інфільтраційного уранового рудоутворення в еоценовому водоносному горизонті Девладівського родовища, підземного вилуговування урану через свердловини, а також

самовідновлення підземних вод горизонту протягом 1983–2005 рр. Викладено дані моніторингу підземних вод (залишкових технологічних розчинів) продуктивного горизонту та комплекти карт розподілу компонентів-забруднювачів підземних вод станом на 1982, 1991, 1997, 2005 роки. Здійснено комп'ютерне моделювання динаміки зміни залишкових розчинів і вмісних порід продуктивного горизонту та визначено час самовідновлення підземних вод відносно окремих компонентів-забруднювачів.

Рекультивация землі після ПСВ мінімальна, оскільки ця процедура обмежується витяганням обсадних труб і цементуванням стовбура свердловин до рівня глибини оранки, що забезпечує збереження у не порушеному стані денної поверхні. Також відсутня необхідність у створенні відвалів розкритих порід та експлуатації хвостосховищ. Отже, після відпрацювання родовища або окремої його частини способом ПСВ земельні угіддя можуть бути використані в сільському господарстві без будь-яких обмежень.

Раніше в Україні цим методом вже розроблялися уранові родовища – вищезгадане Девладівське та Братське. На розташованому поруч із Михайлівським Сафонівському родовищі у період з липня 1982 р. по грудень 1985 р.

було проведено дослідно-промислову розробку (ДПР) з ПСВ на рудному тілі № 2 і отримано близько 40 тонн урану (за даними КП "Кіровгеологія").

Розробка невеликих уранових родовищ за допомогою сучасних технологій ПСВ потенційно може суттєво поліпшити вітчизняну сировинну базу.

На основі проведених упродовж 2015–2022 рр. комплексних польових і камеральних радіоекологічних досліджень на кількох екзогенних інфільтраційних родовищах урану осадового чохла та Михайлівському полігенному родовищі Українського щита (УЩ) було виконано комплексну оцінку впливу радіологічної ситуації на довкілля досліджуваної території, геолого-економічне обґрунтування перспектив освоєння уранових родовищ та оцінка можливостей застосування способу ПСВ для їх експлуатації.

Коротка характеристика Михайлівського родовища. У **структурно-тектонічному** плані Михайлівське родовище (рис. 1) розташоване в межах Західноінгулецької структурно-формаційної зони на південному схилі УЩ, у верхів'ї Сафонівської палеодепресії, відкритої у бік Причорноморської западини.

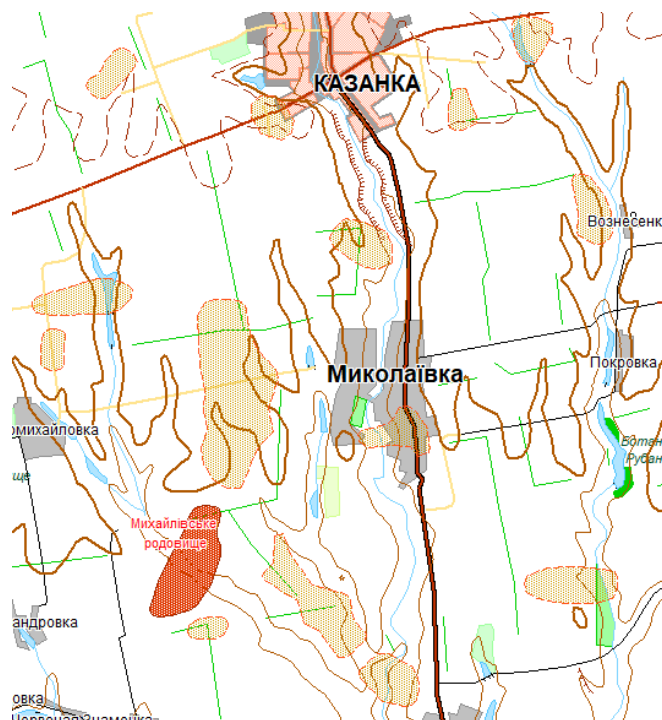


Рис. 1. Михайлівське родовище урану та рудопрояви Михайлівської урановорудної площі

На Михайлівському родовищі уранове зруденіння встановлено в тріщинуватих кристалічних породах (гнейсах, гранітах, мігматитах і пегматитах) та їх корі вивітрювання. Родовище характеризується значними прогнозними ресурсами урану.

Михайлівське родовище є поліхромно-полігенним з проявом трьох рудних етапів та трьох генетичних типів зруденіння (рис. 2). Основна маса руд залягає в гнейсах біотитових з домішкою графіту, які зазнали інтенсивного дроблення, катаклазу, сильно тріщинуваті з накладеними гідротермальними змінами (гематизації, хлоритизації, карбонатизації, піритизації і кварцювання). У гранітах уранове зруденіння локалізоване рідше. Найбільша частка в утворенні промислового уранового зруденіння на родовищі належить гідрогеоному типу руд, який потенційно придатний для промислової розробки способом ПСВ.

Оскільки основна маса руд родовища – убогі і бідні, єдиним рентабельним способом їх відпрацювання є метод ПСВ із застосуванням системи закачувальних і відкачувальних свердловин. Враховуючи особливості геологічної будови Михайлівського родовища, рельєф кори вивітрювання, особливості залягання пластів, розташування тріщинуватих зон тощо, може бути застосована система технологічних свердловин, пробурених не вертикально, а під більшим або меншим кутом до геологічних пластів – уздовж ліній їх нахилу або перпендикулярно до них; тобто свердловини будуть пробурені під кутом до денної поверхні. Водночас відкачувальні свердловини забурюються на більшу глибину, ніж закачувальні (рис. 3).

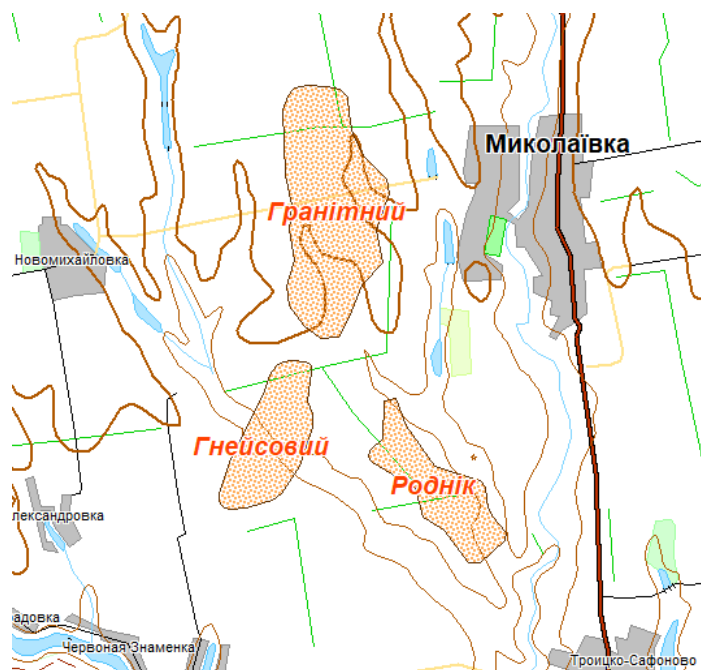


Рис. 2. Рудні поклади Михайлівського родовища

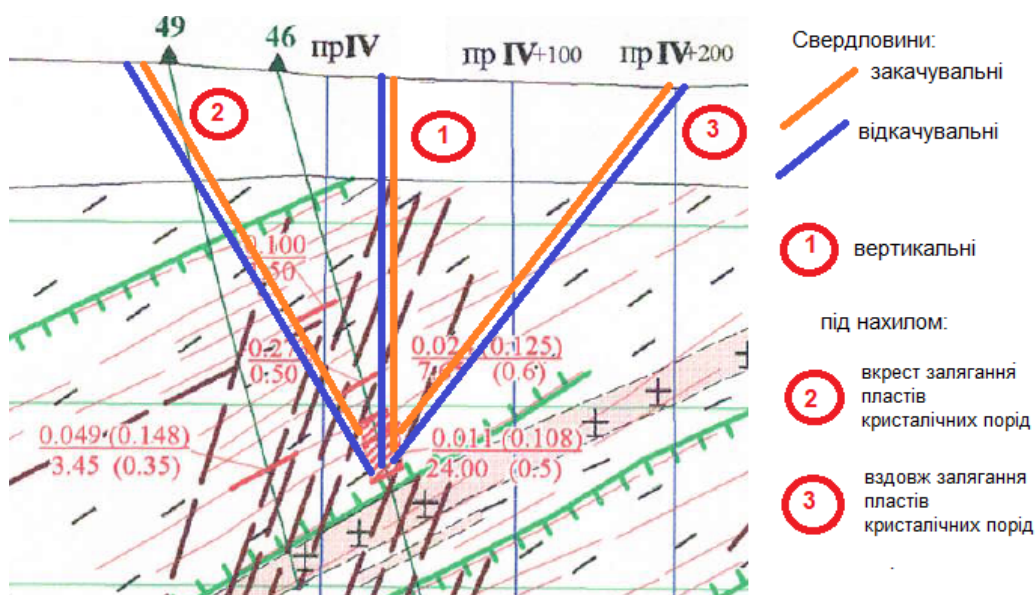


Рис. 3. Варіанти технологічних свердловин для відпрацювання Михайлівського родовища

На стадії оціночних робіт одним з основних завдань було визначення принципової можливості рентабельного вилуговування урану з руд на місці залягання. З цією метою проведено лабораторні і натурні технологічні випробування. Під час лабораторних випробувань для руд найбільш пізньої гіпергенної прожилково-тріщинної уранової черневої мінералізації, сформованої впродовж фанерозою, з концентрацією понад 0,01 %, встановлено добре вилучення урану (до 70–80 %) з отриманням його промислової концентрації в розчині. Цей тип мінералізації створився за рахунок вилуговування урану з різних ендегенних проявів і перевідкладень його в зонах відкритої тріщинуватості. Цьому екзогенному зрудненню, представленому вторинними кофініт-ураново-черневими накопиченнями, у загальному балансі руд Михайлівського родовища належить істотна роль.

У той же час під час натурних випробувань рудних біотитових гнейсів встановлено, що вони мають високу

кислотостійкість і відновні властивості через наявність у них сірководню. Тому сірчана кислота як реагент не може бути застосована через високі її витрати і закупорки шляхів руху розчину гіпсом, що утворюється. Негативним явищем є також висока корозійна активність робочого розчину на основі сірчаної кислоти та агресивність до бетону підземних і ґрунтових вод.

Тому найпоширеніший у практиці спосіб ПСВ урану – з використанням слабких розчинів сірчаної кислоти – малопридатний для відпрацювання Михайлівського родовища. Про це свідчать результати натурних і лабораторних експериментів, які проводились раніше.

Для збільшення ступеня вилуговування урану під час ПСВ зазвичай використовують кілька шляхів: використання іншого вилуговувального агента, підбір окиснювача, підбір концентрацій компонентів вилуговувального розчину. Стислу характеристику окиснювачів наведено в табл. 1.

Для Михайлівського родовища може бути придатне карбонатне або кисневе вилугування.

Карбонатний метод набув найбільшого поширення у США, до його переваг можна віднести: можливість відпрацювання руд з підвищеним вмістом карбонатів ($\text{CO}_2 > 2\%$), високу селективність до урану, меншу мінералізацію продуктивних розчинів, зменшення корозії апаратури. До недоліків належать: невисокий ступінь вилучення урану з руд (60–80 %); повільніша порівняно з кислотним методом кінетика розчинення уранових мінералів ($P:T = 4-6$); менші концентрації урану в продуктивних розчинах; високий ступінь розтікання розчинів за контур відпрацювання, оскільки в процесі вилугування не формуються техногенні геохімічні бар'єри; перехід

у продуктивний розчин до 25 % радію, що міститься у рівноважній руді.

Карбонатне вилугування базується на утворенні розчинних натрій (амоній)-ураніл-карбонатних комплексів. Під час проведення карбонатного ПСВ як окиснювач використовують перекис водню, а також розчинений кисень. Розчинність кисню пропорційна його парціальному тиску над розчином. Отже, потрібно насичувати розчин киснем під тиском.

Ще одним варіантом технології є так званий безреагентний метод, який полягає в закачуванні у рудоносний горизонт кисню повітря, витримці пласта протягом певного часу і подальшого відкачування продуктивних розчинів.

Принципову схему видобування способом ПСВ показано нижче (рис. 4).

Таблиця 1

Окиснювачі, які найчастіше використовуються в технологіях вилугування урану (Тураєв, Жерин, 2005)

Окиснювачі	Недоліки технології
Солі Fe(III)	дефіцит дешевої сировини, дорога технологія її отримання та дорожняча транспортування, зростання концентрації Fe(II) у технологічних розчинах, що призводить до зростання добавки Fe(III) і постійного зростання загального вмісту заліза в робочих розчинах
Перманганат калію	дорожняча реагентів, підвищена корозійна активність
Хлор	дорожняча реагентів, підвищена корозійна активність, депресування сорбції урану хлор-іонами
Гіпохлорит	дорожняча реагентів, підвищена корозійна активність, депресування сорбції урану хлор-іонами
Хлорати	дорожняча реагентів, підвищена корозійна активність, депресування сорбції урану хлор-іонами
Нітрит натрію	необхідна підвищена кислотність, що призводить до недоцільності з економічних, екологічних та технологічних міркувань і до накопичення сполук азоту в робочих розчинах
Азотна кислота	необхідна підвищена кислотність, що призводить до недоцільності з економічних, екологічних та технологічних міркувань і до накопичення сполук азоту в робочих розчинах
Азотиста кислота	необхідна підвищена кислотність, що призводить до недоцільності з економічних, екологічних та технологічних міркувань і до накопичення сполук азоту в робочих розчинах
Перекис водню	дорожняча і вибухонебезпечність сировини
Кисень повітря	низька швидкість процесу, невисока розчинність кисню в робочому розчині
Технологічний кисень	низька швидкість процесу, невисока розчинність кисню в робочому розчині

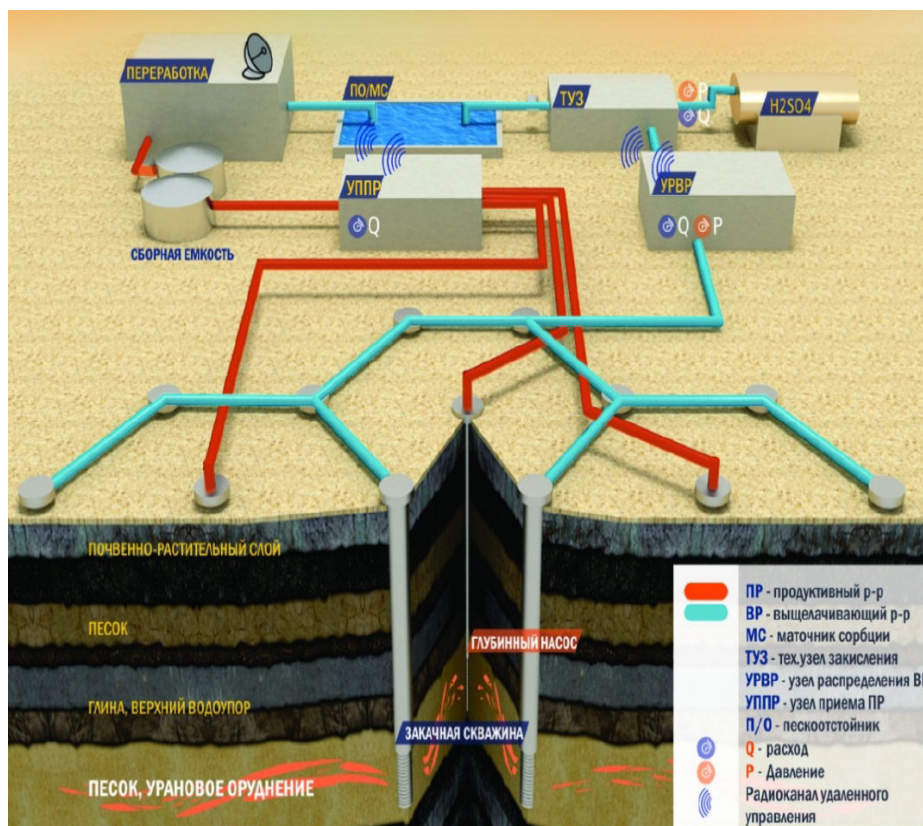


Рис. 4. Принципова схема видобування урану методом підземного свердловинного вилугування

Методи досліджень. У процесі досліджень передусім було проаналізовано і узагальнено існуючі фондові та літературні дані, а також результати попередніх вишукувань, передпроектних досліджень, проєктні матеріали, дані власних досліджень і публікацій, виконаних у ДУ "ІГНС НАН України", щодо геологічних, гідрогеологічних та гідрологічних умов, рельєфу, ландшафту, кліматичних особливостей, ґрунтового і рослинного покриву, соціального середовища, стану об'єктів техногенного впливу на прилеглих до планованого підприємства територіях. У процесі робіт було розроблено та апробовано нову методологію досліджень навколишнього середовища шляхом комплексного дозиметричного і радіометричного знімання поверхневого та приповерхневого горизонтів ґрунтів з метою визначення пошукових і радіо-екологічних параметрів досліджуваної території та полів аномальної активності вимірюваних радіаційних показників. Так, проводився відбір проб ґрунтів шпуровим методом до глибини 1 м і природних поверхневих й підземних вод.

Подальші радіологічні дослідження включали: польові дозиметричні вимірювання потужності експозиційної дози гамма-випромінювання (радіаційний фон), потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання, польові радіометричні випромінювання щільності потоку радону з ґрунту; лабораторні радіометричні вимірювання питомої гамма-активності проб ґрунту, лабораторні радіометричні вимірювання альфа- та бета-активності проб ґрунту для визначення мас-еквівалентного вмісту та активності урану, лабораторні спектрометричні вимірювання радіонуклідів у пробах ґрунту.

Нижче наведено карту розподілу питомої активності, приведеної до урану, отриману за результатами вимірювання інтенсивності альфа- і бета-випромінювання (рис. 5).

Крім того, проаналізовано методи, технологічні показники, основні технічні параметри обладнання для реалізації планованої діяльності з видобування урану способом ПСВ та оцінено їх екологічні характеристики.

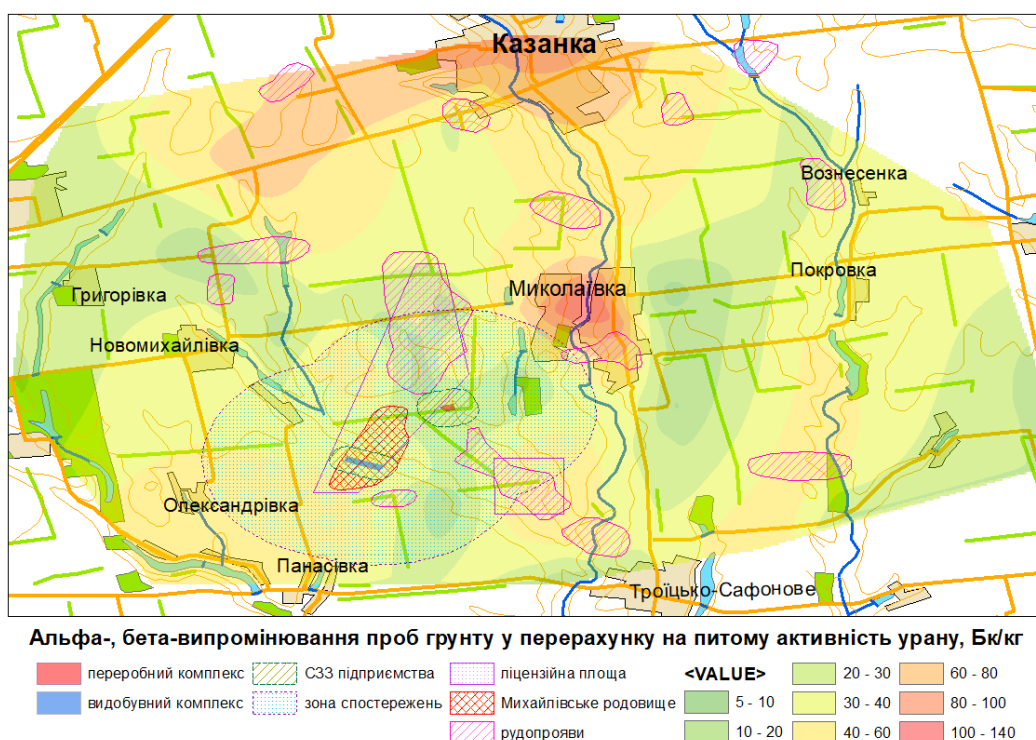


Рис. 5. Активність альфа- та бета-випромінювання, приведена до урану, у пробах ґрунтів

Обговорення результатів. На основі проведених упродовж 2015–2022 рр. комплексних польових і камеральних радіоекологічних досліджень на кількох екзогенних інфільтраційних родовищах урану осадового чохла та Михайлівському полігенному родовищі Українського щита було зроблено комплексну оцінку впливу радіологічної ситуації на довкілля досліджуваної території, геолого-економічне обґрунтування перспектив освоєння уранових родовищ та оцінено можливості застосування способу ПСВ для їх експлуатації.

На Михайлівському полігенному родовищі представлені такі типи уранової мінералізації:

1. Давня вкраплена уранітита мінералізація, що створена в одному віковому інтервалі із вмісними товщами в ранньому протерозої, з ізотопним віком 1,8 млрд років.

2. Гіпергенна прожилково-вкраплена або прожилково-штокверкова ураніт-настуран-кофінітова мінералізація з найбільшим вмістом урану в рудних інтервалах (від

0,05 % до 2%), виявлена серед гнейсів та гранітів у вигляді тонких прожилків (1–2 мм до 10 мм), в асоціації з гідроксидними, глинистими мінералами, хлоритом, карбонатом, альбітом, калішпатом, новоствореним кварцом тощо. Аналогічні уранові мінерали (настуран, ураніт, кофініт) виповнюють і густу вкрапленість навколо цих прожилків. Ізотопний вік зруденіння сягає 0,8–1,0 млрд років.

3. Найбільш пізньою є гіпергенна прожилково-тріщинна уранова чернева мінералізація, сформована впродовж фанерозою. Цей тип мінералізації створився за рахунок вилуговування урану з різних ендегенних проявів і перевідкладень його в зонах відкритої тріщинуватості. Цьому екзогенному зруденінню, представленому вторинними кофініт-ураново-черневими накопиченнями, в загальному балансі руд Михайлівського родовища належить істотна роль. За ізоотно-спектральним визначенням вік уранової черні сягає 0,2–0,4 млрд років, що відповідає герцинській та кімерійській епохам рудоутворення.

Планована діяльність передбачає ДПР уранових руд на ділянці Михайлівського родовища в Казанківському районі Миколаївської області способом ПСВ та їх переробку на місці. Реалізація планованої діяльності буде здійснюватись на базі виробничого комплексу, який складатиметься з двох промислових майданчиків – видобувного та переробного.

Під час розробки родовища способом ПСВ основним фактором впливу на навколишнє середовище, пов'язаним з технологічними особливостями планованої діяльності, є порушення природного режиму та хімічного стану підземних вод, яке відбувається шляхом формування ореолу забруднення водоносного горизонту, приуроченого до продуктивної товщі порід на ділянці видобувного комплексу.

Вплив на атмосферне повітря очікується внаслідок проведення земляних робіт, від викидів будівельної і бурової техніки, автотранспорту та монтажних робіт під час будівництва та від джерел викидів переробного комплексу під час експлуатації; вплив на геологічне середовище від закислення порід продуктивного шару, буріння технологічних і спостережних свердловин; вплив на ґрунти та рельєф від планування території у період будівництва; вплив на водне середовище від скиду очищених дощових стоків та від технологічного втручання в продуктивний водоносний горизонт; збільшення рівня шумового навантаження можливе від роботи автотранспорту та технологічного обладнання.

З метою недопущення погіршення соціально-економічного стану району планованої діяльності в процесі експлуатації видобувного та переробного комплексів будуть використовуватись найбільш екологічно прийнятні технології і методи організації виробництва.

Висновки. Планована діяльність передбачає ДПР уранових руд та їхню переробку на місці. Реалізація планованої діяльності буде здійснюватись на базі виробничого комплексу, який складатиметься з двох промислових майданчиків – видобувного та переробного.

На основі проведених упродовж 2015–2022 рр. комплексних польових і камеральних радіоекологічних досліджень на кількох екзогенних інфільтраційних родовищах урану осадового чохла та Михайлівському полігенному родовищі УЩ виконано комплексну оцінку впливу радіологічної ситуації на довкілля досліджуваної території, оцінку можливостей застосування способу підземного свердловинного вилуговування для їх експлуатації, розроблено пропозиції зі створення системи екологічного менеджменту підприємства та екологічного моніторингу планованої діяльності, а також запропоновано комплекс відновлювальних заходів для ремедіації гідрогеологічних горизонтів після відпрацювання продуктивних покладів.

До відновлювальних заходів належать:

- знімання, збереження та повторне використання родючого ґрунту;
- відновлення надр після відпрацювання родовища;
- демонтаж обладнання, планування порушеного рельєфу, засипка каналів, траншей, томпонування свердловин;
- рекультивація земель і їх повернення до господарського використання за цільовим призначенням.

Основний висновок проведених досліджень полягає в тому, що розробка невеликих уранових родовищ за допомогою сучасних технологій ПСВ потенційно може

суттєво поліпшити вітчизняну сировинну базу і є економічно рентабельною та екологічно виправданою.

Основним напрямом подальших досліджень, на нашу думку, слід вважати проведення експериментальних лабораторних і натурних випробувань щодо ефективності вилуговування урану різними реагентами, зокрема карбоною кислотою, розчинами, насиченими стислим киснем (повітрям) тощо, а також проведення дослідного буріння свердловинами з різним кутом нахилу до ліній залягання геологічних шарів з метою вибору оптимального способу їх улаштування. Зазначені дослідження повинні супроводжуватись екологічною оцінкою наслідків реалізації їх результатів.

Список використаних джерел

- Верховцев, В.Г., Сушук, К.Г., Фомін, Ю.О., Тищенко, Ю.С., Семенюк, М.П., Деміхов, Ю.М., Колябіна, І.Л., Вайло, О.В., Михальченко, І.І. (2019). Металогенія урановорудних районів в осадовому чохла Українського щита. Київ: Наукова думка.
- Лавірова, Р.Л. (Ред.) (1998). Подземное выщелачивание полиэлементных руд. Москва: Изд-во Академии горных наук.
- Макаренко, М.М., Шумлянський, В.О., Суботін, А.Г. (2005). Геологічні умови видобування урану способом підземного вилуговування та природне очищення забруднених підземних вод після його закінчення на Девладівському родовищі. *Наук. праці Інституту фундаментальних досліджень*, 9, 172–181.
- Мамілов, В.А. і др. (1980). Добыча урана методом подземного выщелачивания. Москва: Атомиздат.
- Олейник, О.А., Попов, Н.И., Туктарова, А.Б. и др. (1982). Результаты исследования геологических условий Михайловского месторождения для оценки возможности отработки его способом ПВ, по состоянию на 1.01.1982 г. Кн. 1. Киев.
- Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов. (2005). Уран. Т. 1. Москва: Руды и металлы.
- Сушук, К.Г., Верховцев, В.Г. (2018). Підземне вилуговування урану – переваги та ризики для довкілля. *Зб. наук. праць ІГНС НАН України*, 28, 67–76.
- Сушук, К.Г., Верховцев, В.Г. (2019). Металогенія урану в фанерозої платформної частини України. *Геохімія техногенезу. Зб. наук. праць ІГНС НАН України*, 2 (30), 56–69. <https://doi.org/10.15407/geotech2019.30.056>
- Тураєв, Н.С., Жерин, И.И. (2005). Химия и технология урана. Москва: ЦНИИАТОМИНФОРМ.
- Шумлянський, В., Макаренко, М., Синчук, В. та ін. (2007). Моніторинг природного середовища після добування урану способом підземного вилуговування. Київ: ЛОГОС.

References

- Verkhovtsev, V.G., Sushchuk, K.G., Fomin, Yu.O., Tyshchenko, Yu.Ie., Semeniyuk, M.P., Demikhov, Yu.M., Koliabina, I.L., Vailo, O.V., Mykhalchenko, I.I. (2019). Metaloheniia uranovorudnykh raioniv v osadovomu chokhli Ukrainiskoho shchitya. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]
- Lavayrova, R.L. (Ed.) (1998). Podzemnoe vysshelachivanie polielementnykh rud. Moskva: Izd-vo Akademii gornykh nauk. [in Russian]
- Mamilov, V.A. et al. (1980). Dobyicha urana metodom podzemnogo vysshelachivaniya. Moskva: Atomizdat. [in Russian]
- Makarenko, M.M., Shumlianskyi, V.O., Subotin, A.H. (2005). Heolohichni umovy vydobuvannia uranu sposobom pidzemnoho vyluhovuvannia ta pryrodne ochyshchennia zabrudnennykh pidzemnykh vod pislia yoho zakinchennia na Devladvskomu rodovyskhi. *Nauk. pratsi Instytutu fundamentalnykh doslidzhen*, 9, 172–181. [in Ukrainian]
- Oleynik, O.A., Popov, N.I., Tuktarova, A.B. et al. (1982). Rezultaty issledovaniya geologicheskikh usloviy Mihaylovskogo mestorozhdeniya dlya otsenki vozmozhnosti otrabotki ego sposobom PV, po sostoyaniyu na 1.01.1982 g. Book 1. Kiev. [in Russian]
- Podzemnoe i kuchnoe vysshelachivanie urana, zolota i drugih metallov. (2005). Uran. V. 1. Moskva: Rudy i metalli. [in Russian]
- Sushchuk, K.G., Verkhovtsev, V.G. (2018). Pidzemne vyluhovuvannia uranu – perevahy ta ryzyky dlia dovkillia. *Zb. nauk. prats IHNS NAN Ukrainy*, 28, 67–76. [in Ukrainian]
- Sushchuk, K.G., Verkhovtsev, V.G. (2019). Metaloheniia uranu v fanerotozi platformnoi chastyny Ukrainy. *Heokhimiia tekhnogenezu. Zb. nauk. prats IHNS NAN Ukrainy*, 2 (30), 56–69. <https://doi.org/10.15407/geotech2019.30.056> [in Ukrainian]
- Turaev, N.S., Zherin, I.I. (2005). Himiya i tehnologiya urana: Uchebnoe posobie dlya vuzov. Moskva: TsNIIATOMINFORM. [in Russian]
- Shumlianskyi, V., Makarenko, M., Synchuk, K et al. (2007). Monitorynh pryrodnoho sere dovyscha pislia do buvannia uranu sposobom pidzemnoho vyluhovuvannia. Kyiv: LOHOS. [in Ukrainian]

Надійшло до редколегії 19.11.22

V. Verkhovtsev, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher
e-mail: verkhovtsev@ukr.net

K. Sushchuk, PhD (Geol.-Min.), Senior Researcher
e-mail: IGNS_Sushchuk@nas.gov.ua

Yu. Tyshchenko, PhD (Geol.), Senior Researcher
e-mail: u-risk@ukr.net

S. Meshcheriakov, Leading Engineer
e-mail: IGNS_Meshcheriakov@nas.gov.ua
SI "Institute of Environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine",
34a Ak. Palladina Ave., Kyiv, 03142, Ukraine

I. Koliabina, PhD (Geol.), Senior Researcher
e-mail: IGNS_Koliabina@nas.gov.ua
Institute of Geological Sciences,
55b O. Honchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine

CONTROL OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT OF URANIUM UNDERGROUND WELL MINING (ON THE EXAMPLE OF MYKHAILIVKA POLYGENIC DEPOSIT OF THE UKRAINIAN SHIELD)

Nuclear energy is an important component of Ukraine's national security. Providing this industry with its own raw materials is one of the priority, long-term tasks of the state. One of the ways to successfully solve this task is to create a favorable investment climate for the involvement of private business entities in the development of the domestic mining industry.

In Ukraine, numerous uranium deposits have been explored, which are characterized by relatively small reserves, which is why until recently they were not considered promising for development by the state mining company Eastern Mining and Processing Plant (Zhovti Vody). These deposits are not profitable for development by traditional methods – mining or quarrying, but they can be worked out by the method of underground well leaching. In addition to lower capital costs, this method is also characterized by the fact that it is accompanied by a lower environmental load.

The article highlights some aspects of the generalized results of the impact on the environment of the new activity analysis, which involves the creation of a private enterprise for research and industrial development and subsequent extraction of uranium at the Mykhailivka deposit in the Kazankivskyi district of the Mykolaiv region, which relate to the choice of technology evaluation for the extraction of minerals by the method of underground well leaching. The projected enterprise will consist of several temporary mining sites and a stationary industrial site of the processing complex, as well as engineering and transport infrastructure facilities. After working out the deposit, land reclamation and their return to land users and subsoil rehabilitation will be carried out, which will ensure their restoration to the pre-project state.

On the territory that may be affected by the construction and operation of the planned enterprise, full-scale field and laboratory geo-ecological investigations were conducted and their results were described.

Keywords: uranium, Mykhailivka deposit, underground well leaching, subsoil, impact, environment, technological solutions, crystalline rocks, sedimentary rocks, aquifers.

УДК 553.042

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.13>Є. Майборода, асп.
e-mail: mayboroda1986@gmail.comМ. Курило, д-р геол. наук, доц.
e-mail: kurilo@univ.kiev.uaКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ПРОМИСЛОВІ ТИПИ РОДОВИЩ КАРБОНАТНОЇ СИРОВИНИ ТА ЇХНІ ПАРАМЕТРИ КОНДИЦІЙ ДЛЯ ПІДРАХУНКУ ЗАПАСІВ

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

Систематизовано основні промислові типи родовищ карбонатних порід в Україні та проаналізовано головні напрями їх використання, зокрема металургійне виробництво та цукрова промисловість. Більшість розвіданих запасів карбонатних порід локалізована в межах Донецької області та на території Криму. Кількість розвіданих запасів на решті території не забезпечують достатній термін експлуатації і роботи промислових підприємств більше ніж на 10–15 років. Найефективнішим шляхом забезпечення запасами є перегляд об'єктів, які розробляються сьогодні, в інших напрямках використання (крім металургійної сировини і цукрової промисловості) для виділення частини запасів, які можуть бути придатними для цих дефіцитних напрямів. Проведено аналіз і систематизацію параметрів кондицій для підрахунку запасів різних видів карбонатних порід відповідно до їх промислових типів і вимог геолого-економічної оцінки. Базовими параметрами для підрахунку запасів є відповідність якості, яка визначається напрямом використання у стандартах, глибина підрахунку запасів, мінімальна потужність корисної копалини від 2 м, обмеження контурів у межах ліцензійної площі та гірничого відводу, у контурі кар'єру на кінець розробки. Параметри, які враховують ризики непідтвердження запасів, пов'язані із закарстованістю ділянок, підвищеною глинистістю порід, майже не використовуються, хоча можуть бути важливим інструментом, особливо для експлуатаційних кондицій.

Ключові слова: карбонатні породи, підрахунок запасів, кондиції, промислові типи, вапняки, запаси і ресурси.

Постановка проблеми і аналіз останніх досліджень і публікацій. Карбонатні породи – геологічні утворення, у складі яких переважають карбонати кальцію, магнію і заліза, є значно поширеними об'єктами геологорозвідувальних робіт і оцінки в Україні. Найчастіше вивчаються і залучаються у промислове освоєння родовища вапняків, доломітів, мергелів, мармуру, рідше трапляються – травертини, вапнякова гажа, карбонатити, жильні карбонатні породи. Додатковими видами карбонатної сировини є нелітифіковані утворення (ракуша), карбонатні піски, доломітова мука та інші. Різновидами карбонатних порід є перехідні утворення в рядах вапняк-доломіт і карбонатні породи – глинисті породи, крейда і літографський камінь.

Найчастіше якість корисної копалини карбонатних родовищ визначається напрямом використання сировини. До обліку карбонатних порід в Україні найчастіше потрапляють родовища за такими напрямками використання:

1. Гірничохімічна сировина (переважно вапняки, крейда);
2. Металургійна сировина:
 - флюсові матеріали (переважно вапняки, доломіти);
 - вогнетривкі матеріали (переважно доломіти, магнезит);
3. Будівельні матеріали:
 - будівельне каміння (переважно вапняки, доломіти);
 - декоративне каміння (переважно вапняки, доломіти);
 - пиляльне каміння (переважно вапняки, мергелі, крейда);
 - сировина для в'язучих матеріалів (переважно вапняки, мергелі, крейда);
4. Агрохімічна сировина (переважно вапняки, крейда).

У вітчизняних нормативних документах (Закон України, 2011; Методичні..., 2012) відзначені основні види карбонатних гірських порід (вапняки, крейда, мергель, доломіт, мармур), які переважно приурочені до відкладів силурійської, кам'яновугільної, юрської, крейдової, палеогенової та неогенової систем; вони розповсюджені по всіх регіонах України (Мінеральні ресурси, 2018, 2020).

Найбільшими споживачами карбонатних порід у вітчизняній промисловості є металургійне виробництво,

цукрова промисловість та промисловість будівельних матеріалів.

Актуальність переоцінки мінерально-сировинної бази (МСБ) карбонатних порід сьогодні пов'язана з ускладненим доступом до частини найбільш якісних запасів, які локалізовані в межах Донецької області та Криму. Проблеми забезпеченості запасами зафіксовані в Загальнодержавній програмі розвитку МСБ України на період до 2030 року (Закон України, 2011). У даному документі відзначаються лише два напрями використання: вапняки для цукрової промисловості та флюсові вапняки та доломіти.

Вапняки для цукрової промисловості в Загальнодержавній програмі розвитку МСБ України віднесено до категорії Б, тобто видів мінеральної сировини, "що на даний час в Україні видобуваються в обмежених обсягах, собівартість видобутку яких забезпечує граничний економічно вигідний рівень рентабельності, розробка ускладнюється екологічними проблемами, розвідані запаси родовищ невеликі або виснажені, нові родовища недостатньо вивчені, але потреба в таких видах сировини зумовлена розвитком промисловості". Нестача таких видів мінеральної сировини покривається за рахунок імпорту (Закон України, 2011). У довідкових матеріалах Державного науково-виробничого підприємства "Державний інформаційний геологічний фонд України" (ДНВП "Геоінформ") вказано, що для забезпечення цукрової промисловості використовуються міцні та хімічно чисті карбонатні породи із вмістом CaCO_3 не менш як 93 %. Вапняки цього типу поширені в південній частині Волино-Подільської плити, на південно-західному схилі Українського кристалічного щита, де простежуються два рифові пасма: Подільське і Східне (Мінеральні ресурси, 2018, 2020). Для даного напрямку використання як перспективні розглядаються родовища, запаси яких можуть забезпечити роботу цукрових підприємств України на 15–20 років. У названих матеріалах (Мінеральні ресурси, 2018, 2020) відзначається, що обсяг видобутку вапняків для цукрової промисловості корелює з обсягами споживання цієї сировини і, відповідно, виробництвом цукру.

© Майборода Є., Курило М., 2023

У разі збереження та розширення Національного природного парку "Подільські Товтри", де розташована переважна більшість родовищ вапняків високої якості, запасів вапняків теоретично вистачить тільки на 13–15 років (*Мінеральні ресурси, 2018, 2020*).

Для розширення МСБ у цьому напрямі в Програмі розвитку заплановані пошуки та розвідка родовищ вапняків у Вінницькій та Хмельницькій областях, що може забезпечити приріст запасів та ресурсів вапняків для цукрової промисловості у кількості 40 млн т.

Флюсові вапняки і доломіти в Загальнодержавній програмі розвитку МСБ України віднесено до категорії В, тобто до видів мінеральної сировини, "родовища яких в Україні наявні, запаси їх (у тому числі значні) розвідані, але сировина видобувається в обмежених обсягах або не видобувається взагалі,така мінеральна сировина при сучасному становищі економіки країни не є конкурентоспроможною порівняно з імпоротною сировиною і не може бути рентабельно перероблена на вітчизняних підприємствах відповідно до діючих технологій. Водночас потреба в такій сировині може відновитися як результат освоєння новітніх технологій збагачення або попередньої переробки відповідних руд. Запасами флюсової сировини діючі гірничодобувні підприємства повністю забезпечені, але переважна більшість цих запасів придатна лише для застарілого доменно-мартенівського виробництва сталі. Конверторне та електроплавильне виробництво сталі вимагає ту саму сировину, але високої якості (за хімічним складом та механічною міцністю)". Як вже зазначалося, в Україні розвідані великі родовища високоякісних флюсових вапняків у Кримській і Донецькій складчастих спорудах та Індол-Кубанському прогині, але зараз ці об'єкти не доступні для промислового освоєння.

У Державному балансі запасів корисних копалин обліковується близько 15 родовищ флюсових вапняків із запасами 2,5 млрд т, у тому числі 11 родовищ вапняків флюсових і 3 комплексних об'єкти. Як флюсові матеріали розглядаються і 7 родовищ доломіту, з яких 4 розробляються. За значних загальних запасів вогнетривких доломітів, загальний обсяг яких становить 380 млн т, підприємства України відчувають дефіцит у високоякісних марочних сортах, наявний обсяг яких сягає всього 36 млн т (*Мінеральні ресурси, 2018, 2020*). У Загальнодержавній програмі розвитку МСБ України у цьому напрямі передбачаються: розвідка західної ділянки Стилського родовища, оцінка запасів Родниківського родовища та ділянки Балка Безводна Оленівського родовища для конверторного та електроплавильного виробництва сталі (*Закон України, 2011*). Запланований приріст запасів та ресурсів флюсових вапняків у кількості 2215 млн т запланований був для об'єктів, які локалізовані у Донецькій області, у тому числі на тимчасово окупованих територіях.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Більшість публікацій і досліджень щодо оцінки МСБ карбонатних порід стосуються систематизації та обліку об'єктів без урахування змін і ускладненого або відсутнього доступу до запасів унаслідок військових дій і тимчасової окупації окремих регіонів України. На сьогодні більшість високоякісних розвіданих запасів карбонатних порід локалізовані в межах Донецької області та на території Криму. Кількість розвіданих запасів на решті території не забезпечують достатній термін експлуатації і роботи промислових підприємств більше ніж на

10–15 років. З урахуванням необхідного часу для розвідки і підготовки родовищ карбонатних порід, який становить щонайменше 3–5 років, найефективнішим шляхом забезпечення запасами є перегляд об'єктів, які розробляються сьогодні, в інших напрямках використання (крім металургійної сировини і цукрової промисловості) для виділення частини запасів, які можуть бути придатними для цих дефіцитних напрямів.

Формулювання цілей статті. Для вирішення такого завдання необхідним є аналіз і систематизація параметрів кондицій для підрахунку запасів різних видів карбонатних порід відповідно до їхніх промислових типів і вимог геолого-економічної оцінки.

Виклад основного матеріалу. Систематизація та аналіз геолого-промислових типів родовищ карбонатних порід є необхідним кроком для встановлення типових параметрів кондицій на мінеральну сировину, які використовують для підрахунку запасів за різними напрямками використання. Генетичні та геолого-промислові типи родовищ карбонатної сировини найбільш систематизовано наведено в роботі (*Михайлов, Курило, 2010*). Відповідно до умов утворення виділяють такі генетичні типи родовищ карбонатної сировини (рис. 1).

Промислова класифікація родовищ вапняків базується на морфологічних, тектонічних і літологічних ознаках, які поряд з кількісними показниками (запаси, вміст корисного компонента і т. ін.) визначають умови експлуатації родовищ і методику їх розвідки. Кореляцію генетичних і промислових типів родовищ вапняків наведено в табл. 1. За морфологією залягання виділяють чотири типи родовищ вапняків, які наведено на рис. 2.

Серед промислових типів родовищ доломітів за морфологічними, тектонічними і літологічними ознаками виділяють:

Тип I. Родовища пластові, горизонтально залягли і пологоспадні:

- витримані за будовою, потужністю і якісними характеристиками;
- не витримані за будовою, потужністю і якісними характеристиками.

Тип II. Родовища пластові, помірно- або крутоспадні:

- витримані за будовою, потужністю і якісними характеристиками;
- не витримані за будовою, потужністю і якісними характеристиками.

Тип III. Родовища пластові, сильно дислоковані та непластові.

Кореляцію генетичних і промислових типів родовищ доломітів наведено в табл. 2.

Об'єкти карбонатних порід для геологічного і техніко-економічного вивчення можуть належати до різних ступенів вивченості, підготовки до промислового освоєння (рис. 3).

Відповідно до Методичних вказівок щодо застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ карбонатних порід (*Методичні.., 2012*), родовища карбонатних порід – це ділянки надр, у межах яких виявлено й оцінено карбонатні породи, що за своїми властивостями, кількістю, якістю та умовами залягання є економічно доцільними для промислової розробки і використання відповідно до встановлених стандартів та технічних вимог споживача. Як бачимо, для оцінювання родовищ залучають не лише кількісні, якісні та гірничо-технічні параметри, але й результати вартісної оцінки.

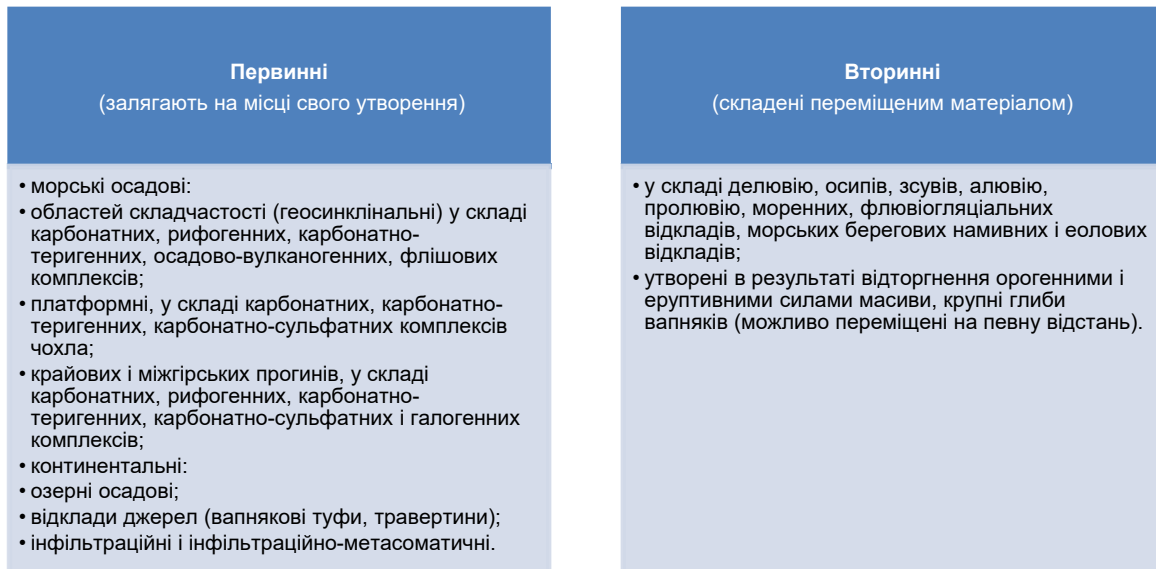


Рис. 1. Узагальнена генетична класифікація родовищ карбонатної сировини



Рис. 2. Типи родовищ вапняку за морфологічними ознаками

Таблиця 1

Співвідношення генетичних і промислових типів родовищ вапняків	
Типи родовищ промислової класифікації	Генетичні типи родовищ вапняків
Родовища пластові Тип 1.1	Морські осадові родовища, за винятком рифогенних Тип 1.2, частково 1.3
Родовища пластові Тип 1.2	Морські осадові родовища Тип 1.1, частково 1.3
Родовища пластові Тип 1.3	Родовища вторинні Тип II
Куполоподібні і грядоподібні масиви Тип II	Морські осадові родовища (рифогенні масиви) Тип 1.1, 1.3
Родовища лінзо- і гніздоподібні Тип III	Родовища континентальні Тип 2.1, 2.2
Родовища рихлого вапнякового матеріалу Тип IV	Родовища вторинні Тип I

Таблиця 2

Співвідношення генетичних і промислових типів родовищ доломітів (за даними (Михайлов, Курило, 2010))

Показники	Генетичний тип родовищ доломітів	
	Родовища у складі доломітових карбонатних комплексів	Родовища у складі вапняково-доломітових карбонатних комплексів
Генетичний тип доломітів	Хемогенні	Діагенетичні
Літологічний тип доломітів	Кристалічні структури	Реліктові структури
Вміст MgO, %	21–19	19–17
Морфологія доломітових покладів	Пластові поклади	Пласти карбонатних порід з нерівномірним розподілом доломітової речовини
Промисловий тип родовищ	1.1, 2.1 промислової класифікації	1.2, 2.2 промислової класифікації
Група і тип родовищ за Інструкціями ДКЗ	Крупні, середні витримані за будовою, потужністю і якістю сировини	Крупні, середні, не витримані за будовою, потужністю і якістю сировини

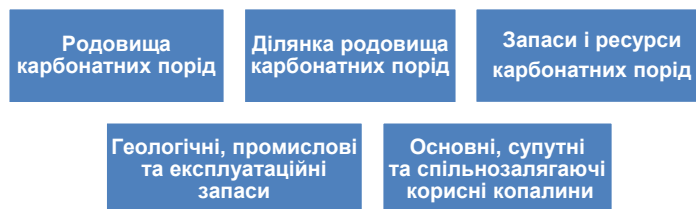


Рис. 3. Можливі об'єкти геолого-економічної оцінки родовищ карбонатних порід

Досить часто об'єктами оцінювання стають не родовища загалом, а окремі визначені ділянки надр, які містять карбонатні породи, що зумовлено такими факторами:

- технічною неможливістю або недоцільністю відпрацювання всієї площі родовища, яка може містити об'єкти інфраструктури, наземні споруди та ін.;
- необхідністю приросту запасів для розширення меж спеціального дозволу під час відпрацювання основної частини запасів;
- обмеженням доступом до ресурсів і запасів карбонатних порід, що спричинений особливостями розподілу земельних ділянок.

Згідно з названими нормативними документами ділянки карбонатних порід – це просторово обмежена частина родовища, виділена за структурними умовами, технологічними особливостями корисної копалини та іншими ознаками, у межах якої слід проводити окремий підрахунок запасів, яка за кількістю запасів є економічно доцільною для промислової розробки (Методичні..., 2012).

Співвідношення основної, супутніх і спільно залеглих корисних копалин при геолого-економічній оцінці карбонатних порід наведено на схемі (рис. 4).

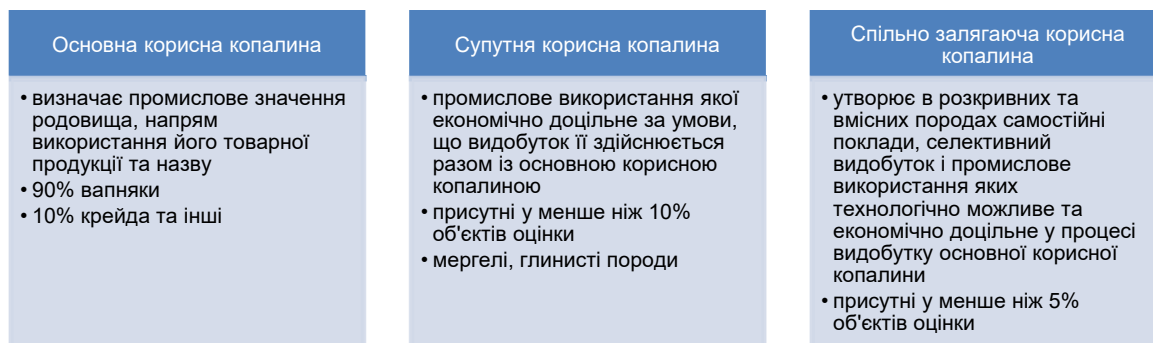


Рис. 4. Співвідношення основних, супутніх і спільно залеглих корисних копалин при геолого-економічній оцінці карбонатних порід

У даному дослідженні було проаналізовано типи мінеральної сировини та параметри кондицій для підрахунку запасів під час проведення геолого-економічної оцінки для 25 родовищ, які локалізовані в Одеській, Херсонській, Миколаївській, Вінницькій, Івано-Франківській областях. У даній вибірці – 90 % родовища вапняків, 10 % – інші види карбонатної сировини, 95 % об'єктів передбачає розробку тільки основної корисної копалини, 5 % – основної і супутніх корисних копалин. Супутні і спільно залегли корисні копалини представлені переважно глинистими породами або пісковиками, які містяться в розкритті. За напрямками використання родовищ 20 % віднесено до флюсової сировини, 80 % – до будівельної сировини, у тому числі сировини для випалювання на вапно. Найчастіше трапляються такі види товарної продукції у процесі розробки карбонатних порід:

- вапно будівельне;
- борошно вапнякове;

- щебінь будівельний;
- флюсова сировина;
- фракціонований щебінь для виробництва вапна;
- відходи для виробництва вапна (відсів).

Особливості розподілу промислових запасів і обсягів розкритих порід для опрацьованої вибірки наведено на рис. 5 та в табл. 3.

Кількість і якість промислових запасів під час геолого-економічної оцінки визначаються відповідно до Положення про порядок розробки та обґрунтування кондицій на мінеральну сировину для підрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах (Положення..., 2006). Головним інструментом обґрунтування граничної якості сировини є параметри кондиції. Згідно з Положенням кондиції на мінеральну сировину – сукупність граничних вимог до якості та кількості мінеральної сировини в надрах, гірничогеологічних умов залягання, гірничотехнічних та інших умов розробки продуктивних покладів,

дотримання яких під час підрахунку забезпечує найбільш повний й економічно ефективний видобуток і використання наявних запасів та ресурсів корисних копалин. Параметри кондицій – граничні значення показників кондицій, які встановлюються для проби, інтервалу, розвідувального перетину, видобувного уступу чи підрахункового блоку продуктивного покладу на підставі техніко-економічних розрахунків, чинних стандартів та

технічних умов, технічних завдань користувачів надр, досвіду геологорозвідувальних робіт та експлуатації родовищ (Положення..., 2006).

Для даної вибірки були систематизовані переважні показники кондицій, що трапляються у 90 % родовищ, які оцінювалися (табл. 4).

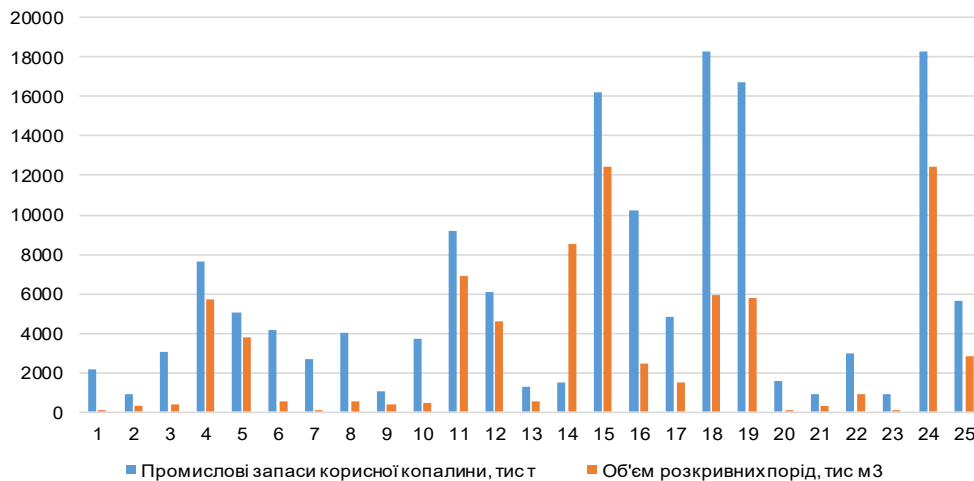


Рис. 5. Особливості розподілу промислових запасів і обсягів розкривних порід

Таблиця 3

Оціночні параметри промислових запасів карбонатних порід

№	Параметри промислових запасів	Min	Max	Середнє значення	R var
1	Промислові запаси корисної копалини, тис. т	888	18262	5650	17375
2	Об'єм розкривних порід, тис. м³	80	12411	2838	12331
3	Річна потужність кар'єру	0	1515	437	1515
	• по корисній копалині	21	802	211	781
	• по розкриву	1	1305	431	1304
4	Промисловий коефіцієнт розкриву	0.04	5.57	0.71	6
5	Термін забезпеченості підприємства запасами	3	115	28	112

Таблиця 4

Базові показники кондицій при ГЕО родовищ карбонатних порід

№	Показники кондицій	Переважні значення показників
1	Стратиграфічна приуроченість корисної копалини	вапняки юрського та крейдового віку, вапняки верхнього міоцену
2	Нижня межа підрахунку запасів	горизонт залежно від гірничо-технічних умов експлуатації
3	Відповідність корисної копалини вимогам	ДСТУ Б В.2.7-109:2001 "Породи карбонатні для виробництва вапна. Технічні умови"
		ДСТУ Б В.2.7-138:2007 "Щебінь, гравій та пісок декоративні з природного каменя. Технічні умови"
		ТУ У 08.1-0029 1747-010:2012 "Вапняки флюсові звичайні, доломітизовані та доломітні"
		ДСТУ Б В.2.7-75-98 "Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови"
		ДСТУ Б В.2.7-90:2011 "Вапно будівельне. Технічні умови"
		ДСТУ 7446:2013 "Меліоранти вапнякові. Технічні умови"
		ДСТУ 8139:2015 "Борошно вапнякове та черепашкове кормове для сільськогосподарської птиці. Технічні умови"
		ДСТУ 8043:2015 "Борошно вапнякове для сільськогосподарських тварин. Технічні умови"
		ДСТУ Б В.2.7-246:2010 "Камені бортові і стінові з гірських порід. Технічні умови"
		виробництва вапна відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-27-95 та ДСТУ Б В.2.7-166:2008
		вимоги ТУ У 08.1-37834815-001:2019 "Вапняки флюсові для доменного, конвекторного, сталеплавильного і феросплавного виробництва"
4	Граничні вмісти корисних і баластних компонентів	CaCO ₃ – не менш як 74–75 %, вміст MgCO ₃ – не більш як 5–9 %, глинистих домішок (SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) – не більш як 10–18 %
5	Мінімальна потужність корисної копалини	від 2 м
6	Максимальна сумарна питома активність природних радіонуклідів у пробі – 370 Бк. х кг ⁻¹ (ДБН В.1.4-1.01.97 "Регламентовані радіаційні параметри. Допустимі рівні")	
7	Локалізація промислових запасів	у межах ліцензійної площі та гірничого відводу, у контурі кар'єру на кінець розробки
8	Марка щебеню з вапняків	за подрібнюваністю, за стиранністю, за морозостійкістю

Висновки. Отже, визначено головні промислові типи та напрями використання мінеральної сировини, якими є сировина для будівельної індустрії та флюсова сировина для металургії. Базовими параметрами для підрахунку запасів є відповідність якості, яка висувається напрямом використання у стандартах, глибина підрахунку запасів, мінімальна потужність корисної копалини від 2 м, обмеження контурів у межах ліцензійної площі та гірничого відводу, у контурі кар'єру на кінець розробки. Параметри, які враховують ризики непідтвердження запасів, пов'язані із закарстованістю ділянок, підвищеною глинистістю порід, майже не використовуються, хоча можуть бути важливим інструментом особливо для експлуатаційних кондицій.

Визначені параметри кондицій є інструментом для геолого-економічної переоцінки родовищ карбонатної сировини з можливим виділенням частини запасів, які можуть бути використані у дефіцитних напрямках, особливо як флюсові матеріали. Такий напрям переоцінки є ефективним шляхом приросту розвіданих запасів карбонатної сировини, який не вимагає так багато часу і інвестицій, як розвідка і підготовка до промислового освоєння нових родовищ.

Список використаних джерел

Закон України "Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року". (2011). *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*, 44, 457.

Ye. Mayboroda, PhD Student
e-mail: mayboroda1986@gmail.com

M. Kurylo, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.
e-mail: kurilo@univ.kiev.ua

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

Методичні вказівки щодо застосування Класифікації запасів і ресурсів корисних копалин державного фонду надр до родовищ карбонатних порід. (2012). <https://www.dkz.gov.ua/ua/diyalnist/normativno-pravova-baza>

Мінеральні ресурси України. (2018). К.: ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України", 270 с.

Мінеральні ресурси України. (2020). К.: ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України", 270 с.

Михайлов, В.А., Курило, М.М. (2010). Мінерально-сировинна база флюсової сировини України. К.: Ніка Центр, 198 с.

Положення про порядок розробки та обґрунтування кондицій на мінеральну сировину для підрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах. (2006). *Офіційний вісник України* від 15.02.2006, № 5, с. 137, ст. 246, код акту 35044/2006.

References

The Law of Ukraine On the Approval of the National Program for the Development of the Mineral and Raw Material Base of Ukraine for the Period Until 2030. (2011). *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 44, 457. [in Ukrainian]

Guidelines for the application of the Classification of Mineral Reserves and Resources of the State Subsoil Fund to carbonate rock deposits. (2012). <https://www.dkz.gov.ua/ua/diyalnist/normativno-pravova-baza> [in Ukrainian]

Mineral resources of Ukraine. (2018). K.: DNVP "State Information Geological Fund of Ukraine", 270 p. [in Ukrainian]

Mineral resources of Ukraine. (2020). K.: DNVP "State Information Geological Fund of Ukraine", 270 p. [in Ukrainian]

Mykhaylov, V.A., Kurylo, M.M. (2010). Mineral and raw material base of flux raw materials of Ukraine. K.: Nika Center, 198 p. [in Ukrainian]

Regulations on the procedure for development and substantiation of conditions for mineral raw materials for the calculation of reserves of solid minerals in the subsoil (2006). *Official Gazette of Ukraine* dated February 15, 2006, No. 5, p. 137, art. 246, act code 35044/2006. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 17.03.23

INDUSTRIAL TYPES OF CARBONATE RAW MATERIAL DEPOSITS AND THEIR CUT OFF PARAMETERS FOR RESERVES ESTIMATION

The article systematizes the main industrial types of carbonate rock deposits in Ukraine and analyzes the main directions of their use. Metallurgical production and the sugar industry are identified as the main areas of use that are in short supply. Most of these explored reserves of carbonate rocks are located within the Donetsk region and the territory of Crimea. The number of explored reserves in the rest of the territory does not provide a sufficient period of operation and work of industrial enterprises for more than 10-15 years. The most effective way to provide reserves is to review the objects that are being developed today in other areas of use (except metallurgical raw materials and the sugar industry) to allocate a part of the reserves that may be suitable for these scarce areas.

The analysis and systematization of the cut-off parameters for the reserves calculation of various types of carbonate rocks in accordance with their industrial types and the requirements of geological and economic evaluation were carried out. The basic parameters for the calculation of reserves are the quality indexes, which are put forward by the direction of use in the standards, the depth of the reserves calculation, the minimum thickness of the mineral from 2 m, the limitation of contours within the license area and the mining right-of-way, in the contour of the quarry at the end of the development. Parameters that take into account the risks of unconfirmed reserves associated with karst areas, high clayey rocks are almost not used, although they can be an important tool especially for operational conditions.

Keywords: carbonate rocks, reserves calculation, conditions, industrial types, limestones, reserves and resources.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 550.47+504.05+582.29

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.14>Ю. Тютюнник¹, д-р геогр. наук, проф.
e-mail: yulian.tyutyunnik@gmail.comО. Шабатура², д-р геол. наук
e-mail: dard@ukr.netО. Блюм¹, канд. біол. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: oleg_blum@ukr.net¹Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України,
вул. Тимирязівська, 1, м. Київ, 01014, Україна;²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, УкраїнаБІОГЕОХІМІЧНЕ ЛІХЕНОІНДИКАЦІЙНЕ ВИВЧЕННЯ СТАНУ
ТА ДИНАМІКИ АТМОСФЕРНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДЕНДРОПАРКУ "АСКАНІЯ-НОВА"

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

Методом біогеохімічної ліхеноіндикації на території дендропарку Біосферного заповідника ім. Фальц-Фейна "Асканія-Нова" (Херсонська обл., Україна) встановлено часові тренди (2011–2021 рр.) концентрацій важких металів та інших мікро- і макроелементів у епіфітних лишайниках.

Зразки лишайників *Parmelia sulcata*, *Xanthoria parietina* та *Evernia prunastri*, зібрані у 2011 (39 точок) та 2021 (44 точки), було проаналізовано на вміст 22 хімічних елементів (Al, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Sb, Se, Sr, Ti, V і Zn) за допомогою методу ICP-OES спектроскопії.

Для коректного порівняння концентрацій елементів у різних видах лишайників було проведено їх інтеркалібрування до базового виду *P. sulcata* та розраховано калібрувальні коефіцієнти, так звані біогеохімічні ліхеноіндикаційні показники (BGCHL показники). На основі цих показників було розраховано середньоарифметичні гіпотетичні концентрації елементів у зразках лишайників, зібраних на ділянках, де *P. sulcata* була відсутня, та створено відповідні бази даних концентрацій елементів для всіх трьох видів.

Для ідентифікації можливих джерел надходження в лишайники визначених елементів за період 2011 (Fa-1 – Fa-8) – 2021 (Fb-1 – Fb-8) років було застосовано факторний аналіз. Вісім отриманих факторів представляють ґрунтовий покрив та антропогенні компоненти. Деякі з факторів були інтерпретовані як такі, що пов'язані із сільськогосподарською діяльністю, мікрокліматом, рН атмосферних опадів і з рослинним фактором (вилугування елементів з дерев та їх поглинання лишайниками).

Факторна структура концентрацій хімічних елементів у лишайниках, що зростають на досліджуваній території, формувалася за умов регіонального накопичення Cr, Na, Ti, а також зниження концентрацій таких елементів, як V, Zn, Mn, Cu, Mg, K, Sr, Ba, Pb, Ni, Ca, S і Se. Крім того, Sb та Ba мають просторово неоднорідну динаміку концентрацій, а Se має дуже неоднорідну динаміку з тенденцією до зменшення.

Ключові слова: лишайники, біогеохімічна ліхеноіндикація, мікро- та макроелементи елементи, важкі метали, забруднення повітря, факторний аналіз, Біосферний заповідник "Асканія-Нова".

Постановка проблеми. Серед планшетних методів геохімічного моніторингу атмосфери біогеохімічна ліхеноіндикація (БГХЛ) посідає одне з провідних місць. Епіфітні листуваті і кушові лишайники вважаються одними з найкращих поглиначів з повітря хімічних елементів і сполук техногенного походження, які надходять в їхні слані у складі атмосферних опадів, опадів пилових аерозолів, а також шляхом поглинання з газів таких елементів, як As, Hg, P і S. І хоча в БГХЛ-індикації як методі моніторингу і наукового дослідження досі існує ряд нерозв'язаних проблем, популярність методу досить велика, і використовується він широко (Бязров, 2002).

У статті подаються результати локальних біогеохімічних ліхеноіндикаційних досліджень на території дендрологічного парку та зоопарку Біосферного заповідника ім. Фальц-Фейна "Асканія-Нова", а також на прилеглих територіях однойменного селища у 2011 та 2021 роках.

Мета дослідження: методом біогеохімічної ліхеноіндикації за показаннями вмісту мікро- та макроелементів у сланях епіфітних лишайників оцінити стан та динаміку забруднення атмосферного повітря на території дендропарку та прилеглих до Біосферного заповідника ім. Фальц-Фейна "Асканія-Нова" територій однойменного селища за період 2011–2021 рр., а також за допомогою факторного аналізу виявити основні джерела та встановити причини надходження у приземну атмосферу досліджуваних хімічних елементів, насамперед найбільш токсичних, якими є важкі метали (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sb, V та Zn) як продукти техногенезу.

З історії попередніх досліджень і публікацій. Досвід проведення історичного біогеохімічного ліхеноіндикацій-

ного моніторингу засвідчив, що цей метод є ефективним і в науковому відношенні – непересічним, таким, що дозволяє робити важливі висновки щодо часових змін у процесах впливу техногенезу на атмосферне забруднення (Lawrey and Hale, 1988; Блюм та Тютюнник, 1985, 1989; Sloof and Wolterbeek, 1991; Purvis et al., 2007; Zhang et al., 2002).

Матеріали і методи дослідження. На досліджуваній території з 10-річним проміжком часу (2011 та 2021 рр.) відбиралися слані епіфітних листуватих лишайників (*Parmelia sulcata* Tayl., *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr.) та кушового *Evernia prunastri* (L.) Ach.). Як відомо, під час пробовідбору важливою методичною умовою є погодні умови. Як у в першому, так і в другому випадку вони були більш-менш однаковими – суха, сонячна погода з помірно вітровою циркуляцією. Але мали місце деякі незначні сезонні погодні відміни, зокрема такі, як вологість і температура повітря, а також переважні напрямки вітру та інші, що певним чином могло впливати на накопичення лишайниками хімічних елементів.

Загалом на одній і тій самій території (дендропарк – зоопарк – прилеглі ділянки селища Асканія-Нова) у 2011 р. лишайники було відібрано на 39 точках, а у 2022 р. – на 44. Точки пробовідбору 2011 і 2022 рр. за своїми координатами не завжди на 100 % збігалися між собою; випадки повного збігу становили близько третини від загальної кількості точок. Але й великих просторових відмін між розташуванням точок 2011 і 2022 рр. не було. Просторовою похибкою в розбитті мережі пробовідбору також можна знехтувати, хоча в ідеалі все ж таки слід було б

прагнути повного збігу координат точок відбору проб у різні періоди. Необхідно зазначити, що відмінності у розташуванні точок пробовідбору у 2011 і 2021 рр. частково були зумовлені об'єктивними обставинами: за 10 років деякі дерева і чагарники були вирубані або всохли. Натомість на цих місцях підросли інші дерева і чагарники, і на них з'явилися нові придатні для пробовідбору лишайники.

Підготовка відібраних проб (зразків лишайників) до аналізу здійснювалася стандартними методами, прийнятими у біогеохімії. Застосовувалося мокре озолення проб лишайників за допомогою азотної кислоти (HNO_3) марки ОСЧ з використанням спеціальної системи мікрохвильового розкладання зразків Speedwave Xpert DAP-60X (Berghof, GmbH, Німеччина). Вимірювання концентрацій хімічних елементів у розчині здійснювалося на плазмово-емісійному спектрометрі ICAP 6300 DUO (Thermo-Fisher Corporation, США). У зразках лишайників визначався вміст Al, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Sb, Se, Sr, Ti, V та Zn. Вміст хімічних елементів перераховувався на повітряно-суху вагу лишайника і виражався у мкг/г (або $\cdot 10^{-4} \%$). Помилка вимірювань коливалася від 7 % до 12 % (для різних хімічних елементів була різною). Внутрішньолaborаторний контроль точності результатів вимірювань здійснювався з використанням стандартного сертифікованого зразка моху M2 (Moss Reference Material M2, Pleurozium schreberi – The Finnish Forest Research Institute), використовуючи критерій сумісності.

Одна з методичних складностей роботи полягала в тому, що не в усіх точках пробовідбору траплялися одні й ті ж самі види лишайників. Тому ми застосували так званий біогеохімічний ліхеноіндикаційний показник (БГХЛ-показник), який дозволяє коректно порівнювати між собою точки пробовідбору з різними видами лишайників (Блюм та ін., 1988).

Суть цього методу полягає в тому, що шляхом попарного порівняння середньоарифметичних значень вмісту кожного елементу в усіх зразках різних видів лишайників, зібраних в одному і тому ж пункті (точці), визначалися коефіцієнти калібрування. У подальшому ці коефіцієнти калібрування дозволяють розрахувати гіпотетичну концентрацію елементу за формулою (1) для виду лишайника, який не зростає в даному пункті, за вимірною концентрацією того ж елементу у слані іншого наявного тут лишайника:

$$K_{\text{іпготет.}} = a \cdot K_{\text{вимірюв.}}, \quad (1)$$

де a – коефіцієнт співвідношення (коефіцієнт калібрування).

У нашому випадку з-поміж трьох видів лишайників, що відбиралися для моніторингу у 2011 та 2022 рр. (*P. sulcata*, *X. parietina* та *E. prunastri*) як базовий вид, на який проводилися перерахунки, була обрана *P. sulcata*. БГХЛ-показник, що відображає середній багаторічний вміст хімічного елементу у приземному шарі повітря, виражався в мкг/г абсолютно-сухої маси лишайника *P. sulcata*.

Аналіз та інтерпретація створених нами за матеріалами дослідження баз даних БГХЛ-показників за 2011 і 2022 рр. проводилися за допомогою факторного аналізу.

Характеристика поля атмосферного забруднення в районі дослідження та виявлення причин його формування. Виходячи з досвіду власних попередніх досліджень (Тютюнник та Блюм, 2017), а також даних інших авторів (Гавриленко та Моргуєн, 2006; Моргуєн, 2002, 2003, 2007а, 2007б, 2009; Цвей та ін., 2001), розглянемо ті фактори, що можуть зумовлювати формування атмогеохімічного поля та накопичення хімічних елементів лишайниками на території дендропарку "Асканія-Нова" і на прилеглих до нього досліджуваних територіях.

Ці фактори можна поділити на загальні (регіональні, глобальні) і специфічні (тобто локальні, притаманні лише даному району). Другий важливий момент полягає в тому, що в часовому аспекті всі чинники формування геохімічних умов і геохімічного впливу на досліджувану територію поділяються на три таких групи: 1) ті, що з 2021 по 2022 рр. практично не змінилися; 2) ті, що змінилися частково або незначно; 3) ті, що змінилися сильно, кардинально або навіть виникли як нове геохімічне явище.

Група 1:

- загальне (природне і техногенне) повітряне навантаження на лишайники, яке зумовлюється: а) інтенсивністю і складом надходження в приземну атмосферу хімічних елементів від усіх можливих джерел забруднення, б) макрокліматичними умовами міграції та седиментації атмосферних забруднювачів;

- утворення крупнодисперсних аерозолів дезінтеграції ґрунтового покриву;

- вплив солоних морських аерозолів (Чорне море і озеро Сиваш);

- розвіювання висушлих екскрементів тварин;

- рослинний фактор (вилугування елементів з дерев та їх поглинання лишайниками).

Група 2:

- місцеві мікрокліматичні умови міграції та седиментації атмосферних забруднювачів;

- пілопідйом з незадернованих поверхонь ґрунту;

- випадання кислих дощів;

- вплив автомобільного транспорту;

- вплив викидів комунальних опалювальних систем смт Асканія Нова;

- вплив викидів відносно близького до Асканії Нова Північнокримського промислового вузла (міст Армянськ і Красноперекопськ; ПАТ "Кримський Титан", содовий завод, бромний завод) і більш далеких промислових районів Криворіжжя (залізорудна промисловість і чорна металургія повного циклу) і Покровська – Марганця – Нікополя (марганцеворудна промисловість і виробництво феросплавів). Зазначимо, що вплив північнокримських виробництв може за сприятливих метеоумов (несильні вітри південних румбів) досягати заповідника "Асканія-Нова" та прилеглих територій у вигляді шлейфу осідання забруднених повітряних мас, а вплив гірничовидобувних і металургійних підприємств півдня Дніпропетровщини відбувається лише шляхом регіонального повітряного переносу атмосферних забруднювачів (за вітрів північних румбів).

Група 3:

- суттєва інтенсифікація землеробства за 10-річний період (зміна систем зрошування, агротехніки рослинництва з розширенням його хімізації із застосуванням сільськогосподарської авіації);

- масштабне використання навесні 2021 р. отрутохімікатів для труєння ховрахів;

- велика техногенна аварія 2018 р. на підприємстві "Кримський Титан", що супроводжувалася значними понаднормативними надходженнями шкідливих речовин у повітря.

Усереднені по всіх точках відбору проб БГХЛ-показники за 2021 і 2022 рр. подано в табл. 1. З неї видно, що порядок накопичення лишайниками деяких хімічних елементів (вміст елементу А більший або менший за вміст елементу Б за десятиліття, яке сплило, має очевидні зміни (ці елементи в таблиці виділено напівжирним шрифтом). Найсильнішими з них були такі. У 2021 р. порівняно з 2011 р. суттєво (у два рази) зменшилися

накопичення лишайниками кальцію і сірки, помітно в (1,2–1,4 раза) – калію, магнію, стронцію, бору, міді, свинцю та нікелю. Натомість у 2021 р. збільшилося поглинання лишайниками сурми – у три рази, хрому – у два рази, натрію і титану – більше ніж у півтора раза. Зміна – збільшення/зменшення – вмісту інших хімічних елементів теж має місце, але вона менш значуща. Лише

концентрації барію можна вважати такими, що за 10 років не зазнали змін. Кількість та амплітуди змін, що зафіксовані, вже є достатньою підставою стверджувати, що в період між 2011 і 2021 рр. на досліджуваній території мали місце суттєві зміни у стані і структурі атмогеохімічного поля, а отже, і геохімічних чинників, які це поле зумовлюють.

Таблиця 1

Ряди накопичення хімічних елементів у сланях лишайників, відібраних в дендропарку "Асканія Нова" та його околицях, виражені у величинах біогеохімічного ліхеноіндикаційного показника (мкг/г)

Ряд накопичення, усереднений за 2011 і 2021 роки																			
K	Ca	Al	Fe	S	Mg	Na	Mn	Zn	Sr	Ti	Ba	Cu	B	Pb	Ni	V	Cr	Co	Cd
4911	4251	2687	2608	2430	1381	172	81	81	42,5	36,5	23,5	12,5	11,8	11,7	5,3	5,1	2,2	0,89	0,43
Ряд накопичення за 2011 рік																			
K	Ca*	S	Al	Fe	Mg	Na	Mn	Zn	Sr	Ti	Ba	Cu	Pb	B	Ni	V	Cr	Co	Cd
5790	5768	3248	2451	2298	1609	135	86	76	48	28	23,2	14,0	13,9	13,2	6,2	4,9	1,34	0,83	0,40
Ряд накопичення за 2021 рік																			
K	Al	Fe	Ca	S	Mg	Na	Zn	Mn	Ti	Sr	Ba	Cu	B	Pb	V	Ni	Cr	Co	Cd
4031	2923	2918	2773	1612	1153	209	85	76	45	37	23,7	11,0	10,4	9,5	5,3	4,3	2,99	0,94	0,45

*напівжирним підняті хімічні елементи, які виявляють статистичну значущість під час факторного аналізу.

Згідно з даними, що їх наводять Я.П. Цвей зі співавторами (Цвей та ін., 2001), ряд накопичення валових форм тих 14 хімічних елементів, що визначалися також і нами, у верхньому 10-сантиметровому шарі ґрунту дендропарку "Асканія-Нова" є таким: Na > Fe > Ca > K > Mg > Mn > Ni > Zn > Pb > Cr > Sr > Cu > Co > Cd. Неважко побачити, що цей ряд суттєво відрізняється від ряду накопичення хімічних елементів у лишайниках (табл. 1), а отже, і їхньої концентрації у приземній атмосфері. Особливо сильне переміщення позицій у рядах накопичення у ґрунті та в лишайниках спостерігаємо для натрію, калію, цинку і нікелю. Великі відмінності у нагромадженні в лишайниках і ґрунті натрію можна пояснити специфікою геохімічної поведінки (міграція, седиментація, накопичення) морських аерозолів; калію – своєрідністю його поведінки у процесах біогенезу; цинку – геохімічним впливом інтенсивного сільськогосподарського виробництва: накопиченню у ґрунті цинку сприяє зрошувальне рослинництво (Моргул, 2009).

Факторний аналіз баз даних БГХЛ-індикації. Факторний аналіз великих баз даних, отриманих у біогеохімічній індикації, привабливий тим, що в кінцевому підсумку дозволяє охарактеризувати не лише стан геохімічного поля, але й встановити причини, які визначають просторово-функціональну структуру цього поля. Як відомо, розшифровка результатів факторного аналізу завжди має більшою чи меншою мірою ймовірнісний характер і зазвичай спирається на аналітичне та інтуїтивне розуміння дослідником всієї тієї "емпірики", яка може бути "відповідальною" за просторову, структурно-функціональну будову геохімічного поля. Досвід використання факторного аналізу в біогеохімічних ліхеноіндикаційних дослідженнях доводить результативність використання коефіцієнтів кореляції між видами лишайників (Kuik and Wolterbeek, 1994; Sloof and Wolterbeek, 1991).

Особливу увагу привертає робота, виконана для Нідерландів (Sloof and Wolterbeek, 1991), оскільки в ній, так само як і в нашій роботі, подаються результати факторного аналізу великих двох баз даних щодо вмісту 19 хімічних елементів у зразках лишайника *P. sulcata*, відібраних у рамках національного моніторингу, який повторно проводився з проміжком у чотири роки (у 1982–1983 рр. та у 1986–1987 рр.). За результатами цієї роботи геохімічні асоціації хімічних елементів при

коефіцієнтах факторних навантажень 0,6 і більше, у різні роки пробовідбору суттєво змінювалися. Щодо **F1** у пробовідборах 1982–1983 рр. індикативна асоціація хімічних елементів була такою: Sc/La/V/Th/Al/Cr/Fe/Ni/Co/As/Se/Sb, а у пробовідборах 1986–1987 рр. – Th/Sc/Cs/Al; по **F2** за 1982–1983 рр. вона виглядала так: Sc Zn/Cd, а для 1986–1987 рр. – Zn/As/Cr; по **F3** для пробовідборів 1982–1983 рр. – Br (моноасоціація), а для 1986–1987 рр. – Ni/V/Fe; по **F4** в пробовідборах 1982–1983 рр. – Cs, а в 1986–1987 рр. – Cd; по **F5** для відборів 1982–1983 рр. – Hg/Se, а для 1986–1987 рр. – Br; по **F6** в 1982–1983 рр. – Mn, а в 1986–1987 рр. – Hg. Вказані автори запропонували таку інтерпретацію факторів.

F1, F4 (1982–1983) та **F1** (1986–1987) – свідчать про те, що вміст у лишайниках таких елементів, як Al, Cr, Fe, Mn, Sc та Th сильно залежний від складу пилу, що складаються з часточок теригенних порід (*crustal material*); **F2** – (1982–1983, 1986–1987) – викиди металургії цинку та/або електронної промисловості; **F3** (1982–1983) та **F5** (1986–1987) – ймовірно, спалювання вугілля на ТЕС, а також по **F3** (1986–1987) пов'язаний з процесами спалювання нафтопродуктів (Ni, V, Co); **F4** (1986–1987) – ймовірно джерелом Cd та Se є спалювання сміття, виробництво заліза та сталі, а також виробництво сплавів, що містять кадмій; **F5, F7** (1982–1983) та **F6** (1986–1987) зумовлюють вміст Hg, джерело походження якої не встановлено; **F6** (1982–1983) та **F10** (1986–1987) є факторами з відносно сильною залежністю по Mn; ці фактори також є відповідальними за вміст As, Fe, Sb, що може вказувати на високотемпературні технологічні процеси їх походження; **F8** (1986–1987) пов'язаний з викидами автотранспорту, що містять Pb, Mn, V та Pb; **F7** та **F9** (1986–1987) тісно пов'язані з La, а також з W та V відповідно, джерела походження яких не ідентифіковані.

В іншій аналогічній роботі (Jeran et al., 1996) за результати Монте-Карло факторного аналізу даних концентрацій 28 хімічних елементів у 86 зразках лишайника *Hypogymnia physodes* (L.) Nyl., відібраних на території Словенії, було виділено 9 факторів, які були віднесені до матеріалу корінних порід, сталеливарної промисловості, внеску морських аерозольних елементів, металургійної промисловості, процесів спалювання вугілля, а також до деяких інших видів гірничої та промислової діяльності.

М.І. Василевич та Р.С. Василевич (Vasilevich and Vasilevich, 2018) наводять результати факторного

аналізу баз даних вмісту хімічних елементів у лишайниках родів *Usnea* та *Bryoria*, відібраних у тайзі Кольського півострова. Результати факторного аналізу вони інтерпретують так: **F1** – теригенний пил; **F2** – біогеохімічні механізми поглинання хімічних елементів лишайниками; **F3** – **F6** – локальні природні геохімічні особливості екосистем. У роботі (Dörter et al., 2020) також за допомогою факторного аналізу (Positive matrix factorization) було показано, що вміст хімічних елементів у лишайнику *X. parietina* з Туреччини зумовлюється такими чинниками, як міське середовище, поживні елементи лишайників, забруднений ґрунт, рух транспорту та змішаний ґрунт, метаболізм лишайників і спалювання вугілля.

У табл. 2 подано результати факторного аналізу (з використанням обертання факторів Varimax normalized) баз даних БГХЛ-показників пробовідборів 2011 р. (чисельник) і 2021 р. (знаменник). Інтерпретація цих результатів – коефіцієнти факторних навантажень (КФН) і величин пояснюваної дисперсії – дозволили зробити висновки про природу визначальних геохімічних чинників і про силу їхнього впливу на нагромадження хімічних елементів лишайниками в 2011 і 2021 роках. Порівняння коефіцієнтів факторного навантаження та їхніх інтерпретацій за різні роки пробовідборів дозволяє зробити певні висновки про те, як саме і як сильно за десятиліття ці чинники змінилися.

При інтерпретації даних (табл. 2) слід пам'ятати, що КФН у колонці кожного фактора показують (у частках одиниці) величину ймовірності того, наскільки цей фактор є вагомим для відповідного хімічного елементу. Порядок розташування факторів (від першого до восьмого) залежить від того, з якою силою кожен фактор виявляє свій вплив на ті хімічні елементи, що мають в його колонці значущі КФН. Від першого до восьмого сила дії фактору знижується, кількісно її оцінюють за величинами пояснюваної дисперсії.

Евристичною і методичною основою інтерпретації коефіцієнтів факторних навантажень виступають геохімічні асоціації, які утворюються завдяки дії певного фактору. Ці асоціації формуються хімічними елементами з високими КФН по кожному з восьми факторів. Для правильної інтерпретації факторів за асоціаціями важливо визначитись із тим, які саме КФН можуть вважатися "високими", тобто такими, що дозволяють даному елементу входити в геохімічну асоціацію. Опубліковані з біогеохімічної індикації роботи свідчать про те, що всі автори, проводячи факторний аналіз для інтерпретації отриманих даних, беруть до уваги КФН зі значеннями 0,7 і вище. Це значить, що фактор, КФН якого враховується, впливає на входження елементу до асоціації з ймовірністю 70 % і більше. Багато дослідників приймають за поріг інтерпретації коефіцієнтів факторних навантажень значення КФН в діапазоні 0,7–0,5 (тобто від 70 до 50 % ймовірності). Рівень кореляційного зв'язку в 0,7 вказує, що частка дисперсії залежної величини, яка пояснюється моделлю, становить 49 %, а рівень в 0,5 – відповідно 25 %. Обидва пороги є вищими за рівень інформаційного шуму будь-якої експериментальної моделі, а отже, їх можна вважати більш-менш достовірними. Значно рідше величини прийнятних для інтерпретації КФН опускають до 0,4 (40 % ймовірності та 16 % пояснюваної дисперсії). Менші значення КФН приймаються до уваги вкрай рідко, і такі інтерпретації є мало ймовірними.

Ми брали до уваги, як правило, КФН із значеннями 0,6 і вище. Геохімічні асоціації, що формуються відповідним фактором, вважалися достеменно ймовірними. КФН з величинами в діапазоні 0,6–0,5 також залучалися до

інтерпретації, але факультативно – лише в тому випадку, якщо вони підтверджували закономірність утворення достеменних асоціацій (тобто з елементів, для яких КФН = 0,6 і вище). Входження хімічних елементів у геохімічні асоціації з ймовірністю 50–60 % вважали мало ймовірними або тенденціями. КФН, нижчі за 0,5 до уваги не бралися. У таблиці 2 КФН, котрі враховані при інтерпретації факторів, виділені напівжирним шрифтом. Знаки "+" (за замовчуванням не проставлений) та "-" перед КФН означають, що фактор, який цим коефіцієнтом ідентифікується, в геохімічному сенсі "впливає" на поведінку хімічного елементу у протилежних "напрямах". Оскільки бази даних біогеохімічної ліхеноіндикації складаються з величин вмісту хімічних елементів у лишайниках, то логічним буде вважати, що КФН із знаком "плюс" пов'язаний зі збільшенням концентрації певного хімічного елементу в лишайнику, а КФН зі знаком "мінус" – з її зменшенням. Відповідним чином інтерпретується і сам фактор – або як причина нагромадження хімічного елементу у слані лишайника ("+"), або як причина його деконцентрації ("–").

Під час проведення факторного аналізу аналізувалися не тільки факторні навантаження окремо по базах даних за 2011 і за 2021 рр. й порівнювалася дія геохімічних факторів між собою у ці роки та виявлялися причини їхніх змін за десятирічний період. Розглядаючи значення КФН у 2011 і 2021 рр. (табл. 2) неважко помітити, що за десять років вони або: 1) майже не змінилися, або 2) зменшилися чи збільшилися, або 3) перетворилися з достовірних (КФН > 0,6) у 2011 р. на недостовірні (КФН < 0,6) у 2021 р. і навпаки, або 4) обернулися на свою протилежність, змінивши знак "плюс" на "мінус" чи навпаки. Іншими словами, належність F^a та F^b до однієї і тієї ж колонки не означає обов'язково, що F^a та F^b – один і той же чинник. Він може бути одним і тим же чинником, але геохімічний чинник колонки може також зникати або з'являтися в 2011 чи в 2021 році. Це говорить про те, що в одному році КФН діяв, а в іншому – ні. F^a та F^b однієї і тієї ж колонки можуть навіть докорінно змінюватись у геохімічному сенсі, маючи для одного й того ж хімічного елементу знак "плюс" або "мінус". Зазначимо, що подібні зміни геохімічних асоціацій, а отже, і природи факторів впливу в часовому розрізі, були виявлені також й іншими дослідниками навіть у значно меншому (чотирирічному) часовому тренді (Sloof and Wolterbeek, 1991). Враховуючи вищевикладене, перейдемо до інтерпретації і обговорення даних нашого факторного аналізу (табл. 2).

Інтерпретація та обговорення результатів факторного аналізу. Фактор-1. У 2011 р. під впливом фактору F_1^a була сформована геохімічна асоціація $Al(0,96)/Fe(0,85)/Cr(0,66)/Ti(0,64)/Mn^*(0,57)/S^*(0,51)$ (і далі "зірочка" біля символу хімічного елементу показує, що він враховується як "тенденція"). А фактор F_1^b у 2011 р. формує геохімічну асоціацію $Al(0,93)/Fe(0,93)/Mn(0,78)/Cd(0,77)/Pb(0,71)/Mg(0,69)/Co(0,67)$. Перший фактор (F_1^a) вважається найпотужнішим і в літературі пов'язується із загальним пилоаерозольним навантаженням на приземну атмосферу. Воно включає в себе як природні джерела надходження пилу в атмосферу з поверхні ґрунту (теригенний пил), так і техногенні викиди часточок забруднювачів у повітря. У першому факторі можуть переважати природні джерела ґрунтового пиліподію, і тоді в утворенні ним асоціацію будуть входити хімічні елементи, характерні для ґрунтового покриву. Звичайно така ситуація формується на територіях поза зонами активного техногенезу. Якщо в районі досліджень сильнішими є прояви техногенезу, то асоціація хімічних елементів по F_1^a буде представлена

хімічними елементами, характерними для зон техногенезу. Якщо приблизно однаковою мірою важливими є обидва джерела забруднення атмосфери, то геохімічна асоціація міститиме і перші, і другі хімічні елементи. Саме така ситуація спостерігається для наведених вище асоціацій: Al, Fe і Mg є маркерами теригенного пилу; Cd, Pb і Co – індикатори аерозолів, що утворюються в процесі техногенезу (насамперед пірогенезу); а Cr, Ti і Mn притаманні часточкам і теригенного і техногенного походження. Титан, як відомо, є типовим елементом земної кори (його кларк становить 0,57 % по масі, поступаючись лише залізу, алюмінію та магнію) і посідає 9-те місце за поширеністю у природі. Проте ми віднесли його до хімічних елементів як теригенного, так і техногенного походження, оскільки недалеко від заповідника "Асканія-Нова" функціонує підприємство "Кримський титан", де

виробляється двооксид титану (TiO₂), який разом з іншими сполуками (сіркою та іншими) надходить у повітря з викидами цього підприємства. Перший фактор є одним і тим же як у 2011, так і в 2021 р. і може інтерпретуватися як загальне пилоаерозольне навантаження на довкілля у районі дослідження. Але водночас неважко помітити, що F_1^a та F_1^b , будучи у вказані роки практично ідентичними в природному (пиліпідйом) прояві, у техногенному (Cd, Pb, Co) і напівтехногенному (Cr, Ti, Mn) проявах помітно відрізняються по роках. Це свідчить про те, що процеси техногенезу, як джерела забруднення атмосфери в районі дослідження, за минуле десятиліття (2011–2021 рр.) зазнали певних якісних і кількісних змін. Вплив техногенезу в 2021 р. підсилюється, на що вказує також збільшення для F_1^b величини пояснюваної дисперсії.

Таблиця 2

Результати факторного аналізу баз даних БГХЛ показників, отриманих в 2011 (чисельник) і в 2021 (знаменник) роках, для території дендропарку "Асканія-Нова" і прилеглих ділянок

Хімічний елемент	Коефіцієнти факторних навантажень (F^a – фактори 2011 року, F^b – фактори 2021 року)							
	F_1^a	F_2^a	F_3^a	F_4^a	F_5^a	F_6^a	F_7^a	F_8^a
	F_1^b	F_2^b	F_3^b	F_4^b	F_5^b	F_6^b	F_7^b	F_8^b
Al	0,955*	-0,045	0,035	0,079	0,128	-0,094	-0,019	-0,010
	0,931	-0,075	0,131	-0,012	0,017	0,070	0,143	0,049
B	0,013	0,013	0,906	0,135	-0,039	0,080	0,064	-0,028
	0,242	0,410	0,600	-0,245	0,206	-0,262	0,282	-0,121
Ba	0,001	-0,144	-0,026	-0,084	-0,004	0,049	0,018	-0,947
	0,499	-0,025	0,051	0,068	0,730	-0,133	-0,004	0,058
Ca	-0,268	0,182	0,148	0,428	0,490	-0,273	-0,252	-0,291
	0,010	0,586	-0,391	0,073	0,293	0,060	-0,481	0,033
Cd	0,022	-0,099	-0,177	-0,125	0,094	-0,907	0,055	0,041
	0,770	0,214	0,214	0,119	0,240	-0,040	-0,166	-0,061
Cr	0,662	0,241	-0,048	0,222	-0,170	-0,479	0,187	0,033
	-0,061	-0,227	0,003	0,175	-0,210	0,140	0,141	-0,848
Co	0,230	0,185	0,105	0,719	0,431	-0,094	0,095	-0,073
	0,669	-0,099	0,350	-0,037	0,361	0,201	0,001	-0,312
Cu	-0,140	0,758	0,043	0,181	-0,168	0,097	0,428	-0,012
	0,273	0,115	0,002	0,026	0,698	0,297	0,069	0,345
Fe	0,853	-0,038	0,153	0,027	0,276	0,141	-0,103	0,009
	0,925	-0,023	0,043	-0,076	0,044	-0,014	0,193	0,100
K	0,260	-0,127	0,805	-0,031	0,235	0,252	-0,047	0,031
	0,423	0,824	0,101	-0,016	0,055	0,116	-0,089	0,120
Mg	0,122	-0,072	0,124	0,025	0,898	0,044	-0,063	0,017
	0,687	0,525	0,218	-0,083	0,093	-0,162	-0,019	-0,139
Mn	0,572	0,384	0,036	0,108	-0,308	0,294	-0,070	0,175
	0,776	0,016	0,161	0,105	0,278	0,080	-0,135	0,237
Na	0,021	0,062	0,605	-0,198	-0,229	-0,473	-0,151	0,071
	0,201	0,237	-0,007	-0,845	-0,171	0,063	0,006	0,203
Ni	0,455	0,195	0,191	0,667	0,035	0,432	-0,156	0,018
	0,190	-0,417	0,362	-0,212	0,209	0,619	0,137	-0,041
Pb	0,313	-0,276	-0,236	0,212	0,662	0,006	0,044	0,038
	0,713	0,208	0,140	0,135	0,492	-0,173	-0,157	-0,063
S	0,511	-0,326	0,440	0,215	0,332	0,187	0,378	-0,028
	-0,182	-0,114	0,190	-0,708	0,122	-0,048	0,303	0,030
Sb	0,003	0,210	-0,060	-0,143	-0,009	-0,057	0,921	-0,028
	0,126	-0,012	-0,012	0,131	-0,032	0,860	0,055	-0,107
Se	0,066	-0,048	-0,087	0,847	-0,008	0,083	-0,048	0,138
	-0,012	0,153	-0,034	0,071	-0,027	-0,150	-0,903	0,117
Sr	-0,346	0,679	-0,078	0,049	-0,086	-0,556	0,015	-0,073
	0,267	0,086	0,791	-0,210	-0,019	0,047	-0,027	0,153
Ti	0,638	-0,341	0,294	0,366	0,243	0,103	0,021	-0,056
	0,237	-0,028	-0,065	0,641	0,106	0,469	0,315	0,065
V	0,178	0,854	-0,065	0,001	-0,017	0,054	0,058	0,196
	0,249	-0,795	-0,078	0,165	0,054	0,233	0,124	-0,274
Zn	0,424	-0,144	-0,212	-0,290	0,231	0,377	-0,463	-0,083
	0,171	-0,047	0,868	0,072	0,037	0,085	0,034	-0,084
Пояснювана дисперсія, % (2011/2021)	17,9	11,4	10,9	10,8	10,29	10,27	7,2	5,0
	23,9	11,6	10,8	8,8	8,3	8,0	6,9	5,7

*напівжирним позначено хімічні елементи, які виявляють статистичну значущість у факторному аналізі.

Фактор-2. Геохімічна асоціація по $F_2^a \in V(0,85)/Cu(0,76)/Sr(0,68)$, а по $F_2^b - K(0,82)/V(-0,795)/Ca^*(0,59)/Mg^*(0,53)$. Ці асоціації зовсім не схожі між собою, і таке явище, як свідчать результати й інших авторів (Sloof and Wolterbeek, 1991), є не винятком, а певною закономірністю. Єдиний спільний для них елемент – ванадій (V) входить в асоціації 2011-го і 2021-го рр. з протилежним знаком, що вказує на те, що фактори F_2^a і F_2^b діяли в цих роках у "зворотних напрямках". Але констатація того факту, що асоціації "2011" і "2021" по F_2^a і F_2^b є вкрай відмінними, ще не дає абсолютних підстав вважати, що фактори F_2^a і F_2^b також обов'язково є принципово відмінними. Це може бути один і той же чинник, але в різних роках він проявляє себе по-різному. Ми вважаємо, що таким чинником міг бути різним в обох роках такий показник, як рН атмосферних опадів та гідрометеорів. Як зазначалося, проби 2011 р. відбиралися в серпні, а проби 2021 р. – на початку травня. Це означає, що на вміст хімічних елементів у лишайниках могла впливати загальна метеорообстановка, яка на початку травня і в серпні була різною, і по-різному зумовлювала накопичення хімічних елементів лишайниками з повітря. Від неї залежав також "прихід" на територію заповідника "Асканія-Нова" повітряних мас різних типів з різними кількісними і якісними показниками насичення хімічними сполуками. Про це свідчать дослідження Є.М. Моргуна (Моргун, 2003), якими було показано, що рН атмосферних опадів над біосферним заповідником коливається в широких межах – від 3,2 до 7,7. Протягом року переважають кислі і слабокислі опади, що дослідниця пов'язує із впливом атмосферних викидів Північнокримського промвузла. Серпень характеризується здебільшого нейтральними і слабкислими опадами. На квітень же і травень припадає короткий період зменшення кислотності і підвищення лужності опадів, а в окремі роки максимальна річна лужність опадів припадає на квітень. Оскільки водно-міграційні властивості важких металів, що випадають на території заповідника, тісно пов'язані з рН атмосферних опадів, а також їхньою інтенсивністю і формою (Моргун, 2002), цілком вірогідним є те, що процеси сорбції-десорбції та накопичення важких металів лишайниками під час весняного пробовідбору 2021 р. і пізньолітнього пробовідбору 2011 р. значно відрізнялися – впритул до того, що під час пробовідбору-2011 ванадій сланями лишайників більше поглинався, ніж вимивався з них ("+"), а під час весняного пробовідбору 2021 р., навпаки, вимивався ("–"). Підсумовуючи вищевикладене щодо дії факторів $F_2^a - F_2^b$, слід наголосити, що коли на одній і тій самій території ми проводимо біогеохімічні ліхеноіндикаційні дослідження в різні роки, і потім зіставляємо їх результати, лишайники-індикатори для моніторингу потрібно відбирати приблизно в ідентичних метеорологічних умовах і в межах як мінімум однієї і тієї ж самої пори року, а краще – в один і той самий місяць, або, навіть, в одну й ту ж саму фенофазу розвитку дерев. Як бачимо на прикладі дії фактора-2, це є важливим методичним моментом.

Розподіл пояснюваної дисперсії як за $F_3^a, F_4^a, F_5^a, F_6^a$, так і за F_4^b, F_5^b, F_6^b , мало відрізняється за величинами. Це свідчить про приблизно однакову силу геохімічного впливу $F_3^a, F_4^a, F_5^a, F_6^a$ з одного боку, і F_4^b, F_5^b, F_6^b – з іншого, що, у свою чергу, можна розуміти як відсутність жорсткої й однозначної "прив'язки" ступеня вірогідності дії геохімічних причин до конкретних факторних навантажень. Тобто ймовірність того, що, наприклад, фактор F_4^a пов'язаний з якоюсь причиною А, є приблизно такою ж,

якби з цією ж причиною був пов'язаний фактор F_5^a або F_3^a . Інакше кажучи, в діапазоні $F_3^a - F_6^a$ і та $F_4^b - F_6^b$ припустиме відносно вільне переміщення факторів (а отже, і пов'язаних з ними асоціацій) по горизонталі – по колонках. Порядок слідування факторів один за одним у цих позиціях є дещо умовним і обраний він нами саме таким тільки для того, щоб "не псувати" загальної картини слідування величин пояснюваної дисперсії, які зліва направо повинні зменшуватися. Зроблене зауваження є важливим у тому плані, що у вказаних позиціях геохімічні причини по F^a і по F^b , що попадають в одну і ту ж саму колонку ($F_4^a - F_4^b, F_5^a - F_5^b, F_6^a - F_6^b$), із високим рівнем імовірності можуть бути зумовлені різними геохімічними причинами. Це важливий момент під час зіставлення чинників формування атмогеохімічного поля по роках, який утруднює інтерпретацію результатів факторного аналізу.

Фактор-3 маркується такими асоціаціями: по $F_3^a - B(0,91)/K(0,81)/Na(0,61)$; по $F_3^b - Zn(0,87)/Sr(0,79)/B(0,60)$. При цьому за силою дії і в 2011, і в 2021 рр., згідно з величинами пояснюваної дисперсії, він практично однаковий, хоча в той же час (згідно з маркуванням асоціацій) проявляє себе по-різному. Вважаємо, що це фактор впливу сільськогосподарського виробництва, який виявляє себе комплексно і різнобічно, а на приземну атмосферу діє шляхом пилопідйому під час виконання різноманітних агротехнічних робіт у рослинництві.

Підстави для такого висновку такі:

1. Рослинницьке господарство за межами заповідних і сільбищних територій смт Асканія-Нова інтенсивне і чинить безперечно відносно потужний вплив інтенсивного землеробства на території, що охороняються.

2. Калій та бор входять до складу мінеральних добрив; вони обидва наявні в асоціації по F_3^a , а по асоціації F_3^b – лише бор.

3. Калій, як типовий водний мігрант, з верхніх шарів ґрунту (цей елемент вноситься з добривами) гарно вимивається. У разі посилення промивного режиму ґрунту пилопідйом часточок, що містять калій, буде зменшуватися. Промивний режим ґрунту в районі дослідження з 2011 р. по 2021 р. посилювався, оскільки за цей час набули поширення системи інтенсивного зрошування. Тому зникнення калію з асоціації елементів по фактору F_3^b є закономірним.

4. Непрямо про підсилення за десятиліття промивання верхнього шару ґрунтів у районі досліджень свідчить також і випадання з асоціації F_3^b натрію. Як зазначалося вище, згідно з даними Я.П. Цвея зі співавторами (Цвей та ін., 2001), натрій, який приноситься сюди з морськими аерозолями, у верхніх шарах ґрунтів заповідника "Асканія-Нова" накопичується найсильніше. Але будучи чудовим водним мігрантом, він, так само як і калій, у разі збільшення інтенсивності вертикального промивання ґрунту, мігрує в його нижні шари, і перестає брати участь в утворенні теригенного пилу. Тож випадання натрію по фактору 3 також є закономірним.

5. Цинк, згідно з даними Є.М. Моргуна (Моргун, 2009), в асканійських ґрунтах під час їх зрошування збільшується, а значить, цей хімічний елемент надходить до теригенного пилу в значно більшій кількості: Тому в F_3^b Zn і з'являється в асоціації, що маркує чинник сільськогосподарського виробництва. Щодо появи в асоціації F_3^b стронцію, то тут важче зробити вірогідні припущення; можливо, його роль у зрошуваних ґрунтах зростає тому, що більш розчинний хімічний аналог цього елементу – кальцій вимивається в нижні шари ґрунту.

Фактор-4 у 2011 і 2021 рр. маркується також двома різними асоціаціями: $F_4^a - Se(0,85)/Co(0,72)/Ni(0,67)$;

$F_4^b - S(-0,71)/Na(-0,85)/Ti(0,64)$. Його можна інтерпретувати як вплив пило-аерозолів повітряних мас регіонального переносу відмінного походження (різних румбів). F_4^a – це вплив дрібнодисперсних аерозолів конденсації, що утворилися у віддалених зонах техногенезу (насамперед Північнокримського промвузла), і принесені до заповідника "Асканія-Нова" Se, Co і Ni є достатньо типовими компонентами таких аерозолів. F_4^b – це вплив повітряних мас також регіонального переносу, але насичених теригенним пилом і збіднених морськими аерозолями (Se, Na). Такі повітряні маси можуть надходити на територію заповідника "Асканія-Нова" здебільшого із західними вітрами. Зміни впливу різних типів переносу повітряних мас і румбів можуть пояснюватися або загальним підсиленням/зниженням дії повітряної маси певного типу у різні роки, або, як за факторами F_3^a та F_3^b , сезонними коливаннями регіонального руху повітряних мас. Але в обох випадках, якщо розглядати природу четвертого фактору (F_4^a та F_4^b) в загальних рисах, то його можна визначити саме як чинник регіонального повітряного переносу повітряних мас.

Фактори 5 та 6, за силою впливу, дуже мало відрізняються як між собою, так і від фактора 4 ($F_4^a \approx F_5^a \approx F_6^a$, а $F_4^b \approx F_5^b \approx F_6^b$). Це утруднює їхнє розуміння. Асоціації за $F_5^a - Mg(0,898)/Pb(0,66)$; $F_5^b - Ba(0,73)/Cu(0,698)$ і $F_6^a - Sb(0,86)/Ni(0,62)$ ми розглядаємо як фактор комплексного імпактного впливу локально забруднених повітряних мас. Цей чинник безпосередньої прямої дії проявляє себе комплексно. Насамперед це автотранспортний вплив на довкілля. Свинець та магній (F_5^a), а також сурма з нікелем (F_6^b) вказують на наявність такого місцевого джерела забруднення повітря, як автомобільний транспорт. По фактору F_6^b свинець поступається місцем нікелю, який характерний для викидів від спалювання нафтопродуктів. На зв'язок нікелю із цим чинником вказують також інші автори (Sloof and Wolterbeek, 1991). Щодо сурми, яка входить до складу матеріалу гальмівних колодок і може слугувати маркером автотранспортного впливу на довкілля, то вона проявила себе в 2021 р. як відносно слабкий маркер такого впливу. Отже Sb здатна виявляти свою індикаційну роль лише за умов, коли роль більш сильних елементів-маркерів, як то свинець, слабшає, що й спостерігається у нашому випадку.

Щодо двох інших асоціацій по факторах 5 та 6, то їх інтерпретація нам видається такою: $F_5^b - Ba(0,73)/Cu(0,698)$ – це теж чинник комплексного імпактного впливу, але вже не автотранспортної його складової, а агропродовольчої. Як вже зазначалося, з 2011 по 2021 рр. на територіях, прилеглих до дендропарку і селища, інтенсифікувалося сільське господарство. Воно супроводжувалося додатковим хімічним навантаженням на довкілля через внесення добрив і застосування отрутохімікатів. Неправильне і надмірне використання останніх в 2021 р. спричинило місцеву екологічну катастрофу (масове отруєння ховрахів). Мідь і барій є хімічними елементами, що входять до складу речовин захисту рослин, меліорантів та добрив. Тож поява цих елементів на одному з перших місць (F_5^b) в контексті комплексної дії імпактного забруднення на екосистему дендропарку може вважатися очікуваною. Значне зменшення в лишайниках у 2011 р. по фактору F_6^a вмісту кадмію $[-Cd(-0,907)]$ свідчить про зниження надходження до екосистем забруднюючих речовин, які мігрують з повітряними масами на далекі відстані у складі регіонального і глобального переносу. Кадмій, за відсутності таких локальних джерел атмосферного забруднення, як кольорова металургія, приладобудування

та цементна промисловість поблизу заповідника "Асканія-Нова", є гарним маркером глобального забруднення атмосферного повітря. Якщо ж згадати, що пробовідбір-2011 відбувався у серпні, коли західний перенос над місцевістю Асканія-Нова є ослабленим, то цілком логічним виглядає припущення, що у випадку від'ємної моноасоціації "кадмій" по фактору (F_6^a) ми і маємо справу із західним переносом, але, так би мовити, від зворотного, тобто через маркування зниженням поглинання лишайниками цього хімічного елементу.

Фактор-7 представлений незвичними і неоднозначно інтерпретованими моноасоціаціями: $F_7^a - Sb(0,92)$ і $F_7^b - Se(0,90)$. Звертає на себе увагу те, що і в 2011, і в 2021 рр. елементи-індикатори фактору F_7^a мають високі КФН. Тобто, яким би незрозумілим не був цей фактор, він виявляє свою дію з високою ймовірністю, хоча і з невеликою силою. Про це свідчать величини пояснюваної дисперсії, які по 2011 і 2021 рр. між собою не дуже відрізняються.

Поза межами розглянутої факторної структури атмосферного забруднення дендропарку "Асканія-Нова" залишилися такі важливі, але не дуже потужні чинники, як мікрокліматичні умови (температура повітря, відносна вологість повітря, швидкість руху повітря та інтенсивність теплового випромінювання), а також циркуляція повітряних мас на території дендропарку, зумовлені його ландшафтно-архітектурними особливостями. Важливість цих чинників для території дендропарку і його околиць була нами показана раніше (Тютюнник та Блюм, 2017). Щоправда, залишається відкритим питання: чому маркерами цього чинника виступають саме сурма (Sb) у 2011 р. і селен (Se) у 2021 р.? Це питання потребує додаткового вивчення, а поки що можна зробити таке припущення. За десятиліття ландшафтно-архітектурні особливості дендропарку зазнали певних змін: мали місце санітарні та ландшафтні рубки, проведено посадочні роботи, молоді у 2011 р. дерева і чагарники підросли, змінивши свій габітус. Все це позначилося на циркуляції повітряних мас усередині насаджень на території дендропарку і зоопарку. Тож не є дивним те, що у 2011 р. особливості цієї циркуляції маркувалися однією моноасоціацією, а в 2021 р. – другою. Сурма, як вже зазначалося, надходить у приземне повітря при стиранні гальмівних колодок, тобто у формі крупнодисперсних пилоаерозолів дезінтеграції. Селен є хімічним аналогом сірки і в техногенезі поводить себе схожим на сірку чином. Сірка ж є маркером газоподібних викидів і викидів дрібнодисперсних аерозолів конденсації, що утворюються в процесах техногенного пірогенезу. Частково це можна перенести і на селен. Можливо, геохімічні особливості, які маркуються сурмою і селеном, їхня, подекуди, техногенно-геохімічна "протилежність" і зумовили те, що саме Sb та Se стали маркерами незначних, на перший погляд малопомітних, але важливих, змін у мікрокліматичній ситуації на території дендропарку. Частково ці зміни, як вже зазначалося вище, були зумовлені ландшафтно-архітектурними трансформаціями дендропарку.

Фактор-8 має ту специфіку, що він не лише моноелементний, як і фактор 7, але ще й має від'ємні значення КФН і в 2011, і в 2021 роках. F_8^a маркується зниженням вмісту в лишайниках барію: $Ba(-0,95)$; а F_8^b – зменшенням вмісту хрому: $Cr(-0,85)$. F_8^a є найслабшим за силою впливу, але водночас, згідно з величинами КФН, його прояв високовірогідний, майже обов'язковий, в обох роках. Вважаємо, що F8 – це, можливо, фактор рослинного впливу – поглинання елементів з ґрунту та їх подальше надходження у лишайники.

Висновки. Проведений у 2011 та 2021 рр. методом біогеохімічної ліхеноіндикації моніторинг із використанням епіфітних лишайників (*Parmelia sulcata*, *Xanthoria parietina* та *Evernia prunastri*) за показаннями середнього багаторічного вмісту 22 мікро- та макроелементів (Al, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Sb, Se, Sr, Ti, V та Zn) в їх сланях та за результатами факторного аналізу цих даних дозволив оцінити стан та динаміку забруднення атмосферного повітря на території дендропарку та прилеглих до Біосферного заповідника ім. Фальц-Фейна "Асканія-Нова" територій однойменного селища. Факторний аналіз дав можливість виявити основні джерела та встановити причини надходження у приземну атмосферу зазначених елементів, з яких найбільш токсичними є такі продукти техногенезу, як важкі метали (Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Sb, V та Zn). Основними джерелами (факторами) надходження в приземну атмосферу та впливу на її забруднення досліджуваними хімічними елементами є:

1. Загальне пилоаерозольне навантаження на приземну атмосферу, що складається як з природного теригеного пилу, так і з пилових аерозолів техногенного походження (F_1^a та F_1^b);
2. Вплив такого важливого хімічного чинника, як pH атмосферних опадів та гідрометеорів, який впливає на поглинання хімічних елементів лишайниками (F_2^a та F_2^b);
3. Загальний і різнобічний вплив сільськогосподарського виробництва (F_3^a та F_3^b), у тому числі вплив локально забруднених повітряних мас від агропромислової діяльності (F_3^b);
4. Вплив пилових аерозолів повітряних мас регіонального переносу відмінного походження (різних румбів) (F_4^a та F_4^b);
5. Вплив автомобільного транспорту (F_5^a , F_5^b);
6. Вплив локально забруднених повітряних мас (F_6^a);
7. Ймовірний вплив мікрокліматичних параметрів на повітряну міграцію, седиментацію і поглинання хімічних елементів лишайниками (F_7^a та F_7^b);
8. Ймовірний фактор рослинного впливу – поглинання елементів з ґрунту та їх подальше надходження у лишайники.

Факторна структура концентрацій хімічних елементів у лишайниках, що зростають на досліджуваній території, формувалася за регіональних умов накопичення Cr, Na, Ti, а також зниження концентрацій таких елементів, як V, Zn, Mn, Cu, Mg, K, Sr, Ba, Pb, Ni, Ca, S і Se. Крім того, Sb та Ba мають просторово неоднорідну динаміку концентрацій, а Se має дуже неоднорідну динаміку з тенденцією до зменшення.

Список використаних джерел

- Блюм, О.Б., Тютюнник, Ю.Г. (1985). Исторический биомониторинг содержания свинца в атмосфере с помощью лишайников. *Допов. НАН України*, сер. Б., 10, 53–55.
- Блюм, О.Б., Тютюнник, Ю.Г. (1989). Исторический аспект регионального мониторинга тяжелых металлов в атмосфере, осуществляемый методом биогеохимической лишеноиндикации (на примере Украинской ССР). *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем*, 12, 73–78.
- Блюм, О.Б., Тютюнник, Ю.Г., Пашченко, В.М. (1988). Биогеохимическая лишеноиндикация тяжелых металлов у приземного шара воздуха мисских ландшафтов. *Укр. бот. журн.*, 3, 66–71.
- Бязров, Л.Г. (2002). Лишайники в экологическом мониторинге. Москва: Науч. мир.
- Гавриленко, В.С., Моргу, С.М. (2006). Вплив екскреторної діяльності мігруючих птахів на вміст важких металів у Великому Чапелському поді. *Вісник Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*, 8, 128–133.
- Моргу, С.М. (2003). Результати моніторингу pH атмосферних опадів та водойм на території заповідника "Асканія-Нова". *Вісник Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*, 5, 121–125.

Моргу, С.М. (2002). Атмосферні опади як джерело надходження важких металів на територію заповідника "Асканія-Нова". *Вісник Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*, 4, 125–129.

Моргу, С.М. (2007а). Важкі метали в ґрунтах Біосферного заповідника "Асканія-Нова". *Заповідні степи України. Стан та перспективи їх збереження: Матеріали Міжнар. наук. конф. Армянськ: ПП Андреев О.В.*, 75–77.

Моргу, С.М. (2007б). Надходження та трансформація важких металів в екосистемах Біосферного заповідника "Асканія-Нова". *Автореф. дис. ... канд. біол. наук. 03.00.16. – екологія*. Київ: Інститут агроекології УААН, 2007.

Моргу, С.М. (2009). Вміст Zn в темно-каштанових ґрунтах Біосферного заповідника "Асканія-Нова". *Вісник Біосферного заповідника "Асканія-Нова"*, 11, 112–115.

Тютюнник, Ю.Г., Блюм, О.Б. (2017). Биогеохимическое лишеноиндикационное исследование содержания продуктов техногенеза в приземном воздухе на территории дендропарка "Асканія-Нова". *Заповідна справа у степовій зоні України: Праці Всеукраїнської науково-практичної конференції, с. Урзуф, 14–15 березня 2017 р.*, Вип. 2., Т. 2, 170–175.

Цвей, Я.П., Широконос, А.М., Феденко, П.Я., Звягінцев, С.С. (2001). Вміст важких металів на моніторингових ділянках Біосферного заповідника "Асканія-Нова". *Наукові записки НАУКМА, 19: Біологія та екологія*, 83–85.

Dörter, M., Karadeniz, H., Saklangıç, U., Yenisooy-Karakas, S. (2020). The use of passive lichen biomonitoring in combination with positive matrix factor analysis and stable isotopic ratios to assess the metal pollution sources in throughfall deposition of Bolu plain, Turkey. *Ecological Indicators*, 113, 106212.

Folkeson, L. (1979). Interspecies calibration of heavy-metal concentrations in nine mosses and lichens – applicability to deposition measurements. *Water, Air and Soil Pollution*, 11, 253–260.

Jeran, Z., Jacimović R., Batič F., Smodiš B., Wolterbeek, H. Th. (1996). Atmospheric heavy metal pollution in Slovenia derived from results for epiphytic lichens. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 354: 681–687.

Kuik, P., Wolterbeek, H.T. (1994). Factor analysis of trace-element data from tree-bark samples in the Netherlands. *Environ. Monit. Assess.*, 32, 207–226.

Lawrey, J.D., Hale, M.E. (1988). Lichen Evidence for Changes in Atmospheric Pollution in Shenandoah National Park, Virginia. *Bryologist*, 91, 1, 21–23.

Purvis, O.W., Chimonides P.D.J., Jeffries T.E., Jones G.C., Rusu A.-M., Read H. (2007). Multi-element composition of historical lichen collections and bark samples, indicators of changing atmospheric conditions. *Atmos. Environ.*, 41, 72–80.

Sloof, J.E., Wolterbeek, H.Th. (1991). Patterns in trace elements in lichens. *Water Air and Soil Pollution*, 57–58 (1), 785–795.

Vasilevich, M.I., Vasilevich, R.S. (2018). Features of heavy metal accumulation by epiphytic lichens in background areas of the taiga zone in the European Northwest of Russia. *Russ. J. Ecol.*, 49 (1), 14–20.

Zhang, Zh.H., Chaia, Z.F., Mao, X.Y., Chen, J.B. (2002). Biomonitoring trace element atmospheric deposition using lichens in China. *Environ. Pollution*, 120, 157–161.

References

- Blum, O.B., Tyutyunnik, Yu.G. (1985). Historical biomonitoring of lead content in the atmosphere with the help of lichens. *Dopov. Nac. akad. nauk Ukr.*, Ser. B, 10, 53–55. [In Russian]
- Blum, O.B., Tyutyunnik, Yu.G. (1989). Historical aspect of regional monitoring of heavy metals in the atmosphere, carried out by the method of biogeochemical lichenoinidication (on the example of the Ukrainian SSR). *Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*, 12, 73–78. [In Russian]
- Blum, O.B., Tyutyunnik, Y.G., Pashchenko, V.M. (1988). Biogeochemical lichen indication of heavy metals in the surface air layer of urban landscapes. *Ukr. Botan. Journ.*, 3, 66–71. [In Ukrainian]
- Byazrov, L.G. (2002). Lichens in Ecological Monitoring, Moscow: Nauchnyi Mir. [In Russian]
- Dörter, M., Karadeniz, H., Saklangıç, U., Yenisooy-Karakas, S. (2020). The use of passive lichen biomonitoring in combination with positive matrix factor analysis and stable isotopic ratios to assess the metal pollution sources in throughfall deposition of Bolu plain, Turkey. *Ecological Indicators*, 113, 106212. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106212
- Folkeson, L. (1979). Interspecies calibration of heavy-metal concentrations in nine mosses and lichens – applicability to deposition measurements. *Water, Air and Soil Pollution*, 11, 253–260. doi: 10.1007/BF00286637
- Jeran, Z., Jacimović R., Batič F., Smodiš B., Wolterbeek, H. Th. (1996). Atmospheric heavy metal pollution in Slovenia derived from results for epiphytic lichens. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 354, 681–688.
- Gavrilenko, V.S., Morgun, E.M. (2006). Influence of excretory activity of migrating birds on the content of heavy metals in the Great Chapel Pod. *News Biosphere Reserve "Askania-Nova"*, 8, 128–133. [In Ukrainian]
- Kuik, P., Wolterbeek, H.T. (1994). Factor analysis of trace-element data from tree-bark samples in the Netherlands. *Environ. Monit. Assess.*, 32, 207–226. doi: 10.1007/BF00546277
- Lawrey, J.D., Hale, M.E. (1988). Lichen Evidence for Changes in Atmospheric Pollution in Shenandoah National Park, Virginia. *Bryologist*, 91, 1, 21–23. doi: 10.2307/3242735
- Morgun, E.M. (2002). Atmospheric precipitation as a source of heavy metals on the territory of the reserve "Askania-Nova". *News Biosphere Reserve "Askania-Nova"*, 4, 125–129. [In Ukrainian]

Morgun, E.M. (2003). Results of pH monitoring of precipitation and reservoirs on the territory of "Askania-Nova" reserve. *News Biosphere Reserve "Askania-Nova"*, 5, 121–125. [In Ukrainian]

Morgun, E.M. (2007a). Heavy metals in the soils of the Biosphere Reserve «Askania-Nova». *Conservations steppes of Ukraine. Status and prospects of their preservation: Materials International. Sci. Conf. Armyansk*, 75–77. [In Ukrainian]

Morgun, E.M. (2007b). Receipt and transformation of heavy metals in the ecosystems of the "Askania-Nova", Biosphere Reserve. *Extended abstract of Candidate's Thesis (Biol.)*: 03.00.16 – Ecology. Kyiv: Institute of Agroecology UAAS. [In Ukrainian]

Morgun, E.M. (2009). Zn content in dark chestnut soils of "Askania-Nova" Biosphere Reserve. *News Biosphere Reserve "Askania-Nova"*, 11, 112–115. [In Ukrainian]

Purvis, O.W., Chimonides P.D.J., Jeffries, T.E., Jones, G.C., Rusu, A.-M., Read, H. (2007). Multi-element composition of historical lichen collections and bark samples, indicators of changing atmospheric conditions. *Atmos. Environ.*, 41, 72–80. doi: 10.1016/j.atmosenv.2006.08.040

Sloof, J.E., Wolterbeek, H.Th. (1991). Patterns in trace elements in lichens. *Water Air and Soil Pollution*, 57-58 (1), 785-795. doi:10.1007/BF00282942

Tyutyunnik, Yu.G., Blum, O.B. (2017). Biogeochemical lichen indication study of the content of products of technogenesis in surface air in the arboretum "Askania-Nova". *Conservation policy in the Steppe zone of Ukraine. Ser. "Conservation Biology in Ukraine": Proceed. All-Ukrainian Sci. Practical Conf., Urzuf, March 14–15, 2017, Issue 2, Vol. 2.* 170–175. [In Russian]

Tsvey, Ya.P., Shirokonos, A.M., Fedenko, P.Ya., Zvyagintsev, S.S. (2001) Content of heavy metals at the monitoring sites of the "Askania-Nova" Biosphere Reserve. *Scientific Notes of NaUKMA, 19: Biology and ecology.* 83–85. [In Ukrainian]

Vasilevich, M.I., Vasilevich, R.S. (2018). Features of heavy metal accumulation by epiphytic lichens in background areas of the taiga zone in the European Northwest of Russia. *Russ. J. Ecol.*, 49 (1), 14–20. doi: 10.1134/S1067413618010137

Zhang, Zh.H., Chaia, Z.F., Maoa, X.Y., Chenb, J.B. (2002). Biomonitoring trace element atmospheric deposition using lichens in China. *Environ. Pollution*, 120, 157–161. doi: 10.1016/s0269-7491(02)00141-0

Надійшла до редколегії 04.10.23

Yu. Tyutyunnik¹, Dr. Sci. (Geog.), Prof.

e-mail: yulian.tyutyunnik@gmail.com

O. Shabatura², Dr. Sci. (Geol.)

e-mail: dard@ukr.net

O. Blum¹, PhD (Geol.), Senior Researcher

e-mail: oleg_blum@ukr.net

¹Gryshko National Botanical Garden of NAS of Ukraine,

1 Tymyryazivska Str., Kyiv, 01014, Ukraine;

²Taras Shevchenko National University of Kyiv,

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

BIOGEOCHEMICAL LICHEN-INDICATION STUDY OF THE STATE AND DYNAMICS OF THE ATMOSPHERIC POLLUTION OF THE ARBORETUM OF THE FALZ-FEIN BIOSPHERE RESERVE "ASKANIA NOVA"

By the method of biogeochemical lichen indication on the territory of the arboretum of the Falz-Fein Biosphere Reserve "Askania-Nova" (Kherson Region, UKRAINE) the temporal trends (2011-2021) in the concentrations of heavy metals and other micro- and macro-elements in the epiphytic lichens was estimated. The lichens samples of Parmelia sulcata, Xanthoria parietina and Evernia prunastri collected in 2011 (39 sites) and 2021 (44 sites) for the concentrations of 22 chemical elements (Al, B, Ba, Ca, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Sb, Se, Sr, Ti, V and Zn) by the ICP-OES spectroscopy were analysed. In order to correctly compare the concentrations of elements in different species of lichens, their intercalibration to the base species P. sulcata was carried out and the calibration coefficients, the so-called biogeochemical lichen indices (BGCHL indices), were calculated. Based on these indices the arithmetically averaged hypothetical concentrations of elements in lichen samples collected at the sites, where P. sulcata was absent, were calculated and corresponding databases of element concentrations for all three species were created. Factor analysis was applied to identify possible sources of the elements determined in the lichens for the period of 2011 (Fa-1 – Fa-8) – 2021 (Fb-1 – Fb-8). The eight resulting factors represent crust and anthropogenic components. Some of the factors were interpreted as being associated with the agricultural activities, microclimate, pH of atmospheric precipitation and with the higher plants factor (leaching of elements and their absorption by lichens). The factor structure of the chemical elements concentrations in the lichens growing on the studied area was formed under regional conditions of the accumulation of Cr, Na, Ti, as well as a decrease in the concentrations of such elements as V, Zn, Mn, Cu, Mg, K, Sr, Ba, Pb, Ni, Ca, S and Se. Moreover, Sb and Ba have spatially heterogeneous dynamics of their concentrations, and Se has very heterogeneous dynamics with a decreasing trend of the concentrations.

Keywords: lichens, biogeochemical lichen indication, micro- and macroelements, heavy metals, air pollution, factor analysis, "Askania-Nova" Biosphere Reserve.

UDC 556, 626.81, 519.6

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.15>

M. Romashchenko¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.
e-mail: mi.romashchenko@gmail.com

V. Bohaienko², PhD (Tech.), Senior Researcher
e-mail: sewab@ukr.net

A. Sardak¹, Researcher
e-mail: anastasiabilobrova1993@gmail.com

O. Nykytiuk¹, Dr. Sci. (Econ.), Prof.
e-mail: nmu_309@ukr.net

¹Institute of Water Problems and Land Reclamation of NAAS,
37 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine,
40 Glushkov Ave., Kyiv, 03187, Ukraine

DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF SUBSURFACE DRIP IRRIGATION SYSTEMS ON THE BASE OF MOISTURE TRANSPORT MODELING

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

The paper considers the problem of determining the depth of drip pipelines installation and the distance between the pipelines within the design of subsurface drip irrigation systems along with the assessment of pulse irrigation regime efficiency. The corresponding optimization problem has an objective function that assesses costs of creating and operating the system and is solved by a genetic algorithm. For each set of system parameters' values the scheduling of irrigation during the growing season is modeled according to the specified pre-irrigation threshold. The simulation is based on the two-dimensional Richards equation approximated by a finite-difference scheme. The characteristics of crop development are determined according to the model based on the change of development stages with the accumulation of a given amount of active temperatures. To take into account the variability of weather conditions modeling is performed for a series of randomly generated weather scenarios.

Keywords: subsurface drip irrigation, pulse irrigation, moisture transport, modeling, optimization.

Introduction. The use of drip irrigation systems, especially subsurface ones, requires significant costs for their construction. The possibility of forming irrigation regimes that provide for the optimal distribution of moisture for crop development, and, accordingly, for highly efficient irrigation, depends on the quality of the choice of subsurface drip irrigation system's (SDIS) parameters.

Determination of design SDIS parameters' values can be carried out by an expert assessment or with the use of mathematical modeling. The background of such modeling is formed, on the one hand, by a description of moisture transport processes in soil, and, on the other hand, by a technological approach to the determination of irrigation schedules and rates on the base of crop development models.

The main approach to irrigation management is based on the control of moisture supply to the root-containing zone of soil (Campbell *et al.*, 1982; Muñoz-Carpena and Dukes, 2005). In it, based on the concept of optimal range of moisture supply that maintains the level of water consumption by irrigated crops equal to or close to the maximal potential level (Campbell *et al.*, 1982), irrigation is started when moisture content lowers down to some pre-irrigation threshold (Campbell *et al.*, 1982) and is carried out until it is raised to the upper limit of optimal range, usually equal to field capacity (FC).

Moisture transport models for the conditions of drip irrigation (e.g., Arbat *et al.*, 2008; Romashchenko *et al.*, 2016) are mainly based on the Richards differential equation (Richards, 1931) in a two-dimensional approximation or are formed from experimentally determined contours of moistened zones (Holzapfel *et al.*, 1990). Algorithms for automated selection of SDIS parameters are, in the majority of cases, optimization algorithms superposed on moisture transport models with objective functions based on economic assessment of irrigation efficiency with restrictions arising from the biological need to provide plants with moisture.

Among the papers investigating the algorithms of this class, we firstly highlight the paper of Kandelous *et al.* (2012). It proposes to carry out modeling throughout the

growing season using a certain model of crop development to determine SDIS parameters considering one weather scenario. Irrigation here is modeled by such parameters as its frequency and duration. Optimization is performed by a meta-heuristic method with an objective function that contains only operating costs.

Further, Seidel *et al.* (2015) consider the set of generated weather scenarios and optimize profit by assessing the reliability of its receipt on this set. Three tasks are sequentially solved — determination of the duration of watering to achieve maximum uniformity of moistening; determination of such irrigation schedule that maximizes water productivity in accordance with certain models of yield and crop development; determination of optimal values of irrigation system's parameters that maximize profit for the fixed irrigation schedule. The cost of system construction is not considered.

In the paper of abd el Baki *et al.* (2017) authors consider single randomly generated weather scenario and a crop development model in which the parameters such as leaf area index (LAI), crop coefficient, and root system's depth depend exponentially on the accumulated transpiration during the season without division into separate development stages.

Among the papers on the application of empirical models in the problems of profit optimization we can highlight, e.g., the paper of Holzapfel *et al.* (1990) that study the modeling of the entire growing season. Although the assessment of the ability to meet the moisture needs of plants by irrigation system, without reducing the generality, can be carried out only in critical phases of crop development, from the best of our knowledge, the vast majority of studies consider optimization of drip irrigation systems' parameters using the modeling of the entire growing season. The reason for this can be the need to estimate seasonal water supply to calculate the values of objective functions that are based on economic criteria.

In general, the development of a model base in the direction of the fullest possible consideration of the factors

© Romashchenko M., Bohaienko V., Sardak A., Nykytiuk O., 2023

influencing economic efficiency of irrigation is highly important for the development of decision support systems in the design of subsurface irrigation systems. Thus, we identify three major components of the studied optimization problem (models of moisture transport, irrigation scheduling, and crop development; weather scenarios; objective function of the problem) and in their context propose a novel technique for the solution of the problem.

Second main problem of design and operation of subsurface drip irrigation systems is choice and justification of the least water-consuming irrigation regime.

Pulse regime of drip irrigation (*Rank and Vishnu, 2021*) provides, in contrast to constant irrigation, the supply of water to the zones of maximum concentration of plants' root systems in the shortest possible cycles of fixed or variable duration in accordance with actual water demand. The use of pulse irrigation regime makes it possible to create moisture levels higher than field capacity in certain zones of moistened volume. In this way, moisture and nutrients become more available to plants in the corresponding zones than when other irrigation regimes are used. This, in turn, leads to a more intensive growth of plants' root systems in moistened zones (*Segal et al., 2006*), which is one of the main features of pulse drip irrigation regime.

Numerous papers are devoted to the modeling of moistening zones under drip irrigation, in particular, using pulsed water supply regime. They can be divided into three classes: papers based on regression analysis of experimental data (e.g., *Karimi et al., 2022*); papers that use soft computing techniques (*Shiri et al., 2020*); and papers in which differential mathematical models of moisture and salt transport are developed and applied (*Romashchenko et al., 2021a; Kim et al., 2021*). The construction of regression and soft computing models requires a large amount of experimental data on the behavior of a specific plant grown in specific conditions, and their extrapolative application can lead to high modeling errors. On the other hand, the models obtained this way are simple and effective in terms of simulation time.

Differential models of moisture transfer allow without significant corrections carrying out predictive modeling when irrigation regime, soil, or crop parameters change. At the same time, most of the studies on such modeling and its use in decision support in irrigation that are known to the authors (see, e.g., *Friedman et al., 2016; González Perea et al., 2020*) consider fixed root systems of plants and do not take into account the hypotheses regarding its dependency on the moistened zones when pulse drip irrigation regime is used. This study is also aimed at filling this gap of knowledge.

Materials and methods.

Moisture transport model and numerical solution scheme. We start from Richards equation (*Richards, 1931*) stated in terms of pressure in a two-dimensional setting in the form (*Romashchenko et al., 2021a*):

$$C(h) \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k(H) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(H) \frac{\partial H}{\partial z} \right) - S, \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, t \geq 0$$

where $h(x, z, t) = \frac{P(x, z, t)}{\rho g}$ is the water head, m ,

$H(x, z, t) = \frac{P(x, z, t)}{\rho g} + z$ is the full moisture potential, m ,

$P(x, z, t)$ is the suction pressure, Pa , ρ is the density of water, kg/m^3 , g is the acceleration of gravity, m/s^2 ,

$C(h) = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ is the differential soil moisture content, $\%/m$,

$\theta(x, z, t)$ is the volumetric soil moisture content, $\%$, $k(H)$ is the hydraulic conductivity, m/s , $S(x, z, t)$ is the source function, $\%/s$, that simulates the extraction of moisture by plants' roots and its supply by subsurface drip irrigation.

The two-dimensional Equation (1) is based on the assumption that the distance between emitters is sufficient to form a uniform wetted zone along irrigation pipelines.

Boundary and initial conditions for Equation (1) as well as the form of the source function are given in *Romashchenko et al. (2021a)*. We assume that a fixed number of plants and irrigation pipelines placed at a given depth are located in the solution domain.

The parameters of subsurface drip irrigation system in the model are the depth of installation and the number of pipelines for a given distance (we consider the case of 10 m). The number, not the distance between the pipelines, was chosen as a parameter to have solution domains of the same size in all modeling scenarios.

Water retention curves of soils are described by van Genuchten's model (*van Genuchten, 1980*) in the form

$$\theta(h) = \theta_0 + \frac{\theta_1 - \theta_0}{\left[1 + (10\alpha|h|)^n \right]^{1-1/n}} \quad (2)$$

with coefficient values that vary from layer to layer and can be obtained on the base of laboratory studies' results (e.g., *Romashchenko et al., 2019*). The dependency between hydraulic conductivity and pressure is represented according to Averyanov's model (*Averyanov, 1982*) in the form

$$k(H) = k_f \left(\frac{\theta(H - z) - \theta_0}{\theta_1 - \theta_0} \right)^\beta, \quad (3)$$

where k_f is the filtration coefficient, β is the fixed exponent, the values of which is taken from experimentally obtained dependencies $k(H)$.

In the presented model irrigation starts at the time when the average moisture content of a root zone becomes less than the specified value (we consider first of all the scenarios where pre-irrigation threshold is at the level of 80% and 90% FC). Irrigation continues until the average moisture content reaches 95% or 100% FC. The value of 95% FC was used in the cases when uneven moistening under drip irrigation leads under certain conditions to significant overwetting or inability to reach high moisture content levels, especially near soil surface. Moisture content is averaged according to the function of root system density with higher weight coefficients for the areas where a root system is denser. The width of a root system depends linearly on its depth and its maximum width is a parameter of the model.

The numerical solution of the initial-boundary value problem for the model based on Equation (1) is performed according to the implicit finite-difference Crank-Nicholson scheme (*Samarskii, 2001*) on a uniform grid. The corresponding linear systems are solved by the TFQMR algorithm (*Freund, 1993*). The initial time step length is taken to be equal to 1 s and changes during the simulation according to the scheme based on the hypothesis about the correlation between time step and the condition number of a matrix along with the correlation of the condition number and the number of iterations of the solution algorithm – the step is multiplied on a given value (here equal to 1.25) when the number of iterations of the TFQMR algorithm exceeds a given maximum value (here 20). The solution at the appropriate time step is then repeated. If the number of iterations

is less when 1/3 of the maximum value, the length of the next time step increases the same way.

The step with respect to the spatial variable is proposed to be found as follows. Starting from a certain value (here 3.3 cm) it decreases until the mean square of differences between the values of the average moisture content in a root zone during one day of simulation with the current number of grid nodes and the number greater on a given value does not decrease below a given value. The initial moisture content is taken close to the pre-irrigation threshold.

Determination of evapotranspiration and generation of weather scenarios. Random weather scenarios are generated by a stochastic weather generator software *weathergen* (<https://github.com/ARVE-Research/gwgen>). Its inputs are the average monthly minimum and maximum temperature, cloudiness, wind speed, total precipitation, and the number of days with precipitation. The output file contains daily values of the same parameters that are supplied as inputs. Because there is no humidity or radiation in this data set, the Hargreaves-Samani formula (Hargreaves and Samani, 1985), which is derived from the Penman-Monteith method, is used to estimate potential evapotranspiration as for calculations it requires only air temperature values and observation point coordinates. Further simulations used the average climatic data for Kherson, Ukraine, obtained from open sources. Our approach allows, in particular, to conduct modeling taking into account climate change by correcting input climatic data according to the scenarios of anticipated changes.

Model of crop development. The root system's depth together with the values of leaf area index (LAI) and crop coefficient are determined according to the model of crop development stages evolution upon accumulation of a certain sum of average daily temperatures (Ritchie and Nesmith, 1991). We assume that the corresponding parameters vary linearly from stage to stage. As an input parameter of the model we use the date of sowing, after which the duration of the growing season and the dynamics of LAI, root system depth, and crop coefficient is determined on the base of the generated weather scenario.

Peculiarities of pulse irrigation regime modeling. When modeling pulse irrigation, we proceed from the hypothesis that when using pulse irrigation regime, especially in the case when several waterings are performed within a day (high-frequency regime), root system is developing in the zones moistened by emitters and its size depends on the size of these zones (Segal et al., 2006). Let us state the modeling problem as follows: at a given irrigation rate, calculate the size of the root-containing zone that depends on the moistened zone created by watering with such a rate.

This problem can be solved by successive approximation according to the following algorithm:

- 1) Fix a certain initial zone where moisture content is maintained and that coincides with the root zone;
- 2) Perform simulation for a period of 1 day and determine the moistened zone as the maximum zone in the period from the beginning of a single watering to the beginning of the next one in which water head increases compared with the initial level by more than a given value, here and further, denoted as "a threshold for determining the moistened zone";
- 3) The obtained moistened zone is the next approximation of the zone where moisture content is maintained;
- 4) Perform modeling (step 2) until the moistened zone stops changing within a given accuracy threshold.

The question in which part of the moistened zone the root system grows most intensively must be solved experimentally. In the absence of experimental data, we

determine the largest possible moistened zone for a given irrigation rate: such threshold for determining the moistened zone is chosen by successive changes at which it is possible to ensure the maintenance of the specified range of moisture content in the largest moistened zone that coincides with the root zone.

In the above-described procedure, the duration of watering is considered fixed and irrigation schedule is adapted to the changes in soil moisture, which is typical for automatic control of drip irrigation (see, e.g., Obaideen et al., 2022). At the same time, situations can emerge in which it is impossible to ensure the maintenance of the specified range of moisture content in the corresponding zone using the given rate. In such cases we assume that rate must be increased.

Input data. Input data described in Romashchenko et al. (2021a, 2021b) were used for computational experiments. A single-layered soil model with the filtration coefficient of 15 cm/day was considered.

Simulation domain was 10 m wide and 1 m deep. At its lower and lateral boundaries the free-flow boundary conditions were set. For modeling, without lowering the generality of the proposed technique, we assume that root systems of plants uniformly fill the corresponding layer of soil.

System parameters optimization procedure. We propose to use a procedure for optimizing the design parameters of SDIS that has the following features:

- 1) A given number of randomly generated weather scenarios is considered;
- 2) The procedure for calculating the objective function for the specific values of pipelines installation depth and the number of pipelines per 10 m is as follows. For each of weather scenarios, the simulation is performed for the entire growing season recording the volume of supplied irrigation water per 1 m of domain width by a given number of pipelines. Then, the seasonal volume of supplied irrigation water and the total length of pipelines per 1 ha are calculated. The price of 1 m³ of water together with the costs of its supply and the price of 1 m of irrigation pipeline together with the costs of its installation are the parameters of the model. The objective function to be minimized is the average among all weather scenarios of the cost of constructing the system and water supply within a given period under constant growing conditions and crop. In the case when during 24 hours irrigation does not lead to the increase of root zone moisture content to the upper limit of the maintained range, the objective function is increased by a given substantially high "penalty value" – this way we cut off the scenarios under which the system cannot provide for the needed irrigation regime.

3) Minimization of the objective function is performed by a genetic algorithm (Mitchell, 1996). The discretization step with respect to the spatial variable is determined automatically for the scenario with the maximum number of pipelines and the minimum depth of their installation, which should ensure the fastest change in moisture content during irrigation.

Because modeling the entire growing season in multiple weather scenarios is a computationally complex problem, we propose to use a simplified model based on the assumption that SDIS is able to provide adequate moistening throughout the season if it is able to perform it during peak water consumption. In the optimization problem based on this assumption, the modeling of irrigation assignment is performed for a limited period (we used value of 10 days) and a fixed, the highest in the considered weather scenarios, evapotranspiration level with crop parameters at the time when this level is reached. Let us note that the level of potential errors in this case can be

determined by the correlation between the dynamics of evapotranspiration and the state of crop development, and also by the correlation between water supply in the modeled period and total seasonal water supply.

Results and discussion.

Testing of system parameters optimization procedure.

Testing of the proposed technique was carried out using monitoring data obtained in 2020 (Romashchenko et al., 2021a, 2021b) during the cultivation of corn in the State Enterprise "Experimental Farm Velyki Klyny" (Kherson region, Ukraine).

An example of the generated weather scenario together with the corresponding values of root system's depth, LAI, and the calculated actual evapotranspiration is shown in Fig. 1. The coefficients of linear dependencies in the crop development model were obtained from field observations.

The modeled distribution of water heads after 4 hours irrigation is shown in Fig. 2 for the case of the distance between pipelines equal to 1 m, the depth of their installation equal to 20 cm, the emitters' flow rate equal to 1.6 dm³/h, and pre-irrigation threshold at the level of 85 % FC. The moistened zones obtained experimentally according to the observations are shown in Fig. 3 (Romashchenko et al., 2021b). The average accuracy of modeling the volumetric

moisture content at the observation points here was ~1 % according to the results given in Romashchenko et al. (2021a). Visual comparison of the data shown in Fig. 2 and Fig. 3 also confirms sufficient accuracy of the simulation.

In the next stage of testing, the procedure of SDIS parameters optimization was executed for the case of modeling the range of 10 days at the highest water consumption level with maintainable moisture content ranges of 80–95 % FC and 90–95 % FC.

The population size of the genetic algorithm was 10 and 10 iterations were performed. The execution time of the algorithm on the SKIT-4 cluster of VM Glushkov Institute of Cybernetics with the use of one 8-core CPU was ~4 hours.

In the case of pre-irrigation threshold equal to 80 % FC, the best option based on the simulation results was to install irrigation pipelines at the distance of 66 cm from each other at the depth of 21.8 cm. The obtained dynamics of the average root zone moisture content, actual evapotranspiration, precipitation, and irrigation events for one of the considered weather scenarios and the full growing season is shown in Fig. 4.

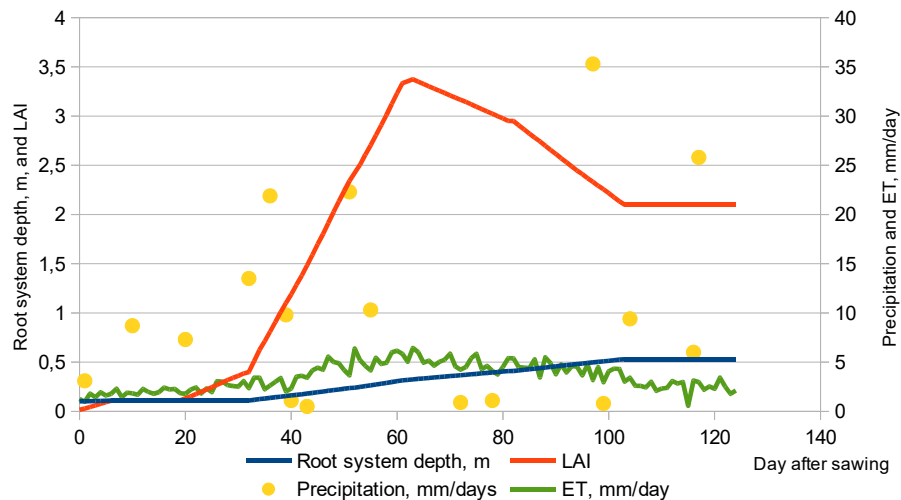


Fig. 1. Example of a weather scenario

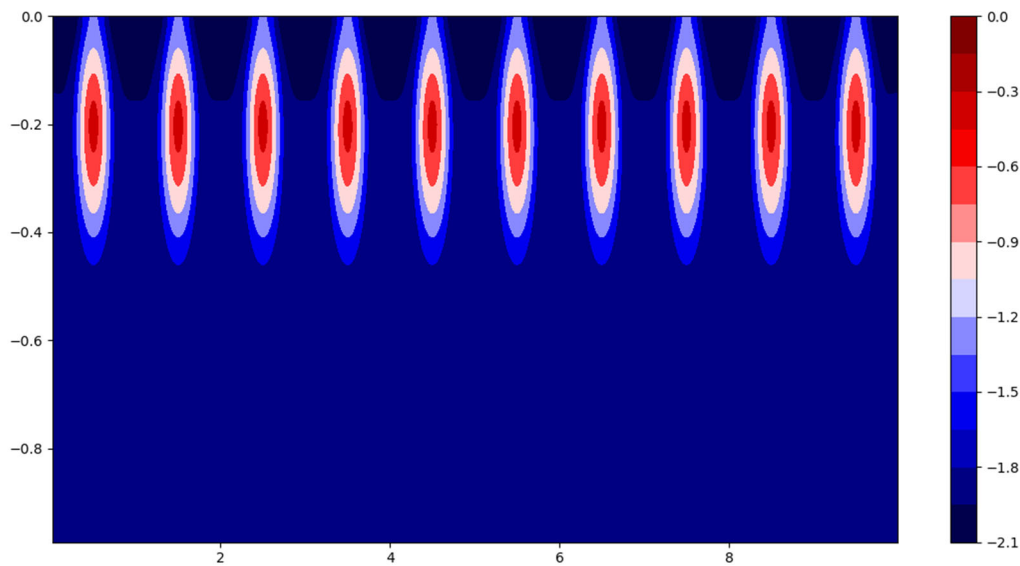


Fig. 2. Water heads, m, 4 hours after the start of irrigation

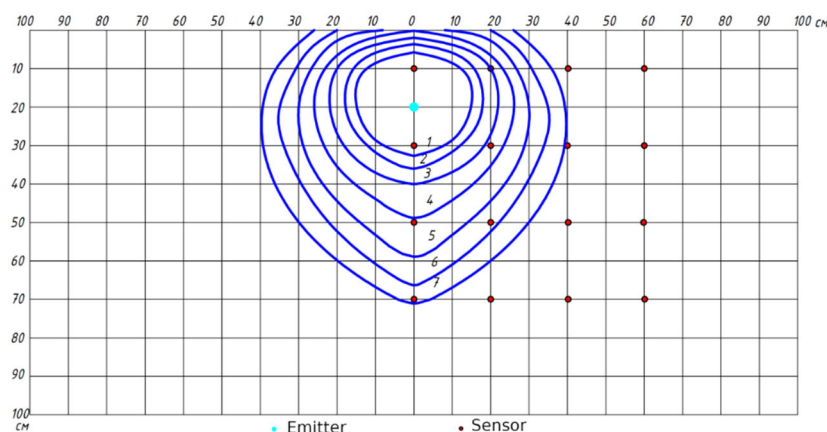


Fig. 3. Contours of the soil profile moistening zones depending on the duration of irrigation, h .

Source: (Romashchenko et al., 2021b)

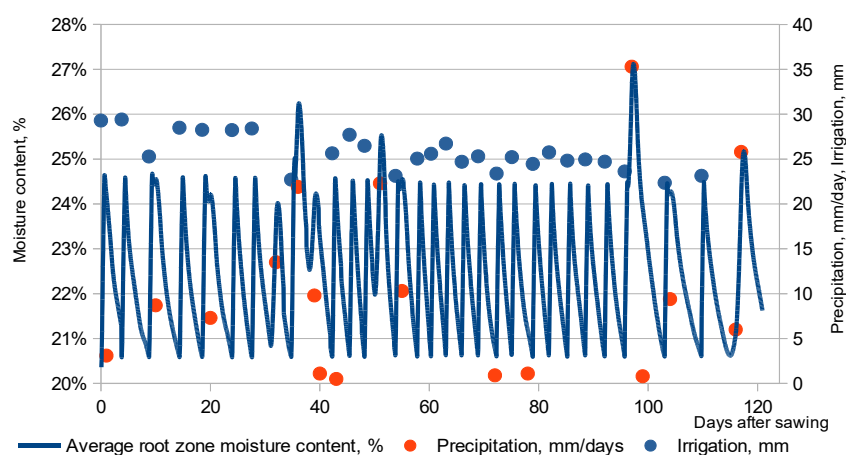


Fig. 4. Dynamics of the average moisture content in a root zone in the case of pre-irrigation threshold equal to 80% FC

The average seasonal water supply among 10 random weather scenarios was 701 mm (27 waterings with rates of 22–29 mm) with the coefficient of variation equal to 3 %; average seasonal evapotranspiration was equal to 465 mm, and total precipitation – to 168 mm. Thus, it can be stated that for a given value of hydraulic conductivity, range of maintained moisture content, and the dynamics of root system's depth, significant moisture losses are possible due infiltration into the layers below a root zone.

In the case of pre-irrigation threshold equal to 90 % FC the determined optimal parameters insignificantly differed from the case of 80 % FC: the distance between pipelines was equal to 62 cm and the depth of installation – to 21.5 cm. Seasonal water supply was equal to 1063 mm

(124 waterings with rates of 7–13 mm). Thus, according to the simulation results, for the filtration coefficient of soil equal to 15 cm/day, an increase of the pre-irrigation threshold leads to a significant increase in moisture losses.

The correlation between the simulated irrigation water supply within 10 days for pre-irrigation threshold equal to 80% FC and seasonal water supply is shown in Fig. 5 for the case of the pipelines installation depth varying from 10 cm to 40 cm and the distance between pipelines varying from 50 cm to 200 cm. The relative error of calculating seasonal water supply from water supply within 10 days did not exceed 11 % that proves the ability to use the simplified optimization problem for decision support.

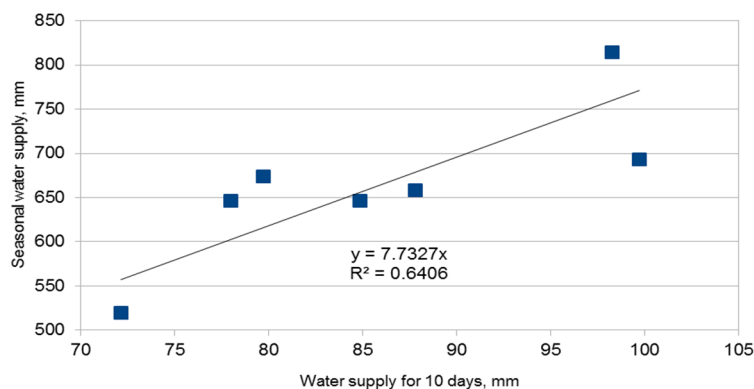


Fig. 5. Correlation between the simulated irrigation water supply within 10 days and the corresponding seasonal water supply

Assessing the efficiency of pulse irrigation regime.

Mathematical modeling of high-frequency pulse regime was carried out according to the above-described model with the following values of parameters:

- pipelines installation depth – 20 cm, flow rate – 1.6 l/h, distance between emitters – sufficient to form strip moistening, distance between pipelines – 66 cm;
 - Soil characteristics obtained on the base of survey data at the State Enterprise "Experimental Farm "Velyki Klyn" (Romashchenko et al., 2021a, 2021b) were used as basic ones: filtration coefficient – 15 cm/day, saturated moisture content – 33.6 %, field capacity – 25.8 % (pressure – 8.0 kPa). Similar simulations were carried out using the hydrophysical characteristics of 20 types of soils obtained on the basis of the data of their granulometric composition using the Rosetta software (we thank S.S. Kolomyiets, who conducted laboratory studies of soils at the State Enterprise "Experimental Farm "Velyki Klyn", and V.P. Kovalchuk, who processed literature data on the granulometric composition of soils). Soils were considered homogeneous; data on their upper layer (up to 20/30 cm) were used throughout the simulation domain depth. The values of the parameter β in Averyanov model was assumed to be equal to 3.5 for all 20 soils;
 - The maintained moisture content range is 95–100 % FC. 95% FC corresponds for a basic soil to volumetric moisture content of 24.5% (pressure – 10.4 kPa). The initial moisture content was taken at the level of the pre-irrigation threshold;
 - The average evapotranspiration over the modeled surface was taken at the level of 5.1 mm/day. Evapotranspiration in the zones shaded by the plants was assumed to be entirely due to transpiration, and in the inter-row area it was modeled as exclusively evaporation from soil surface. We assume that the width of plants' root systems is equal to the width of the zone where plants shade the soil.
- The results of modeling according to the presented technique in the case of soil characteristics obtained according to the surveys at the State Enterprise "Experimental Farm "Velyki Klyn" with fixed evapotranspiration are shown in Table 1. The change in irrigation regimes with a change in

evapotranspiration is shown in Table 2. In the case of the results given in Table 2 watering time was not less than 10 minutes and increased if necessary.

From the data given in Table 1 it can be seen that an increase in irrigation time leads to an increase in the volume of moistened zone and, accordingly, the total volume of irrigation. At the same time, the loss of moisture due to outflow into the horizons lower than the root zone also increases.

In all cases, the dynamics of total moisture volume in the simulation domain became close to periodic after 1–2 days of simulation. Stability was ensured due to the initial use of moisture reserves, the volume of which decreased with an increase in watering time.

According to the simulation results given in Table 1, the overall outflow moisture volume and the use of moisture reserves decreases when moving from 5-minute to 10-minute waterings, remaining constant with a further increase of duration. Because of this, in further computational experiments, the value of 10 minutes was chosen as the basic duration of watering.

The data given in Table 2 demonstrate that under such an irrigation regime, an increase in evapotranspiration by 1.5 times compared to the base level leads to the need to increase the duration of irrigation by 9% to ensure the maintenance of the required moisture content range. In this case, the flow below the 1 m layer decrease with an increase in the use of moisture reserves. In the case of 1.5 times evapotranspiration decrease an opposite trend is observed. Thus, the modeling results give us grounds for stating that with the implementation of pulse water supply regime in order to minimize infiltration water losses it is necessary to maintain a differentiated level of moisture supply – higher in periods of high evapotranspiration and lower in periods of low evapotranspiration.

The results of modeling for 20 types of soils of Ukraine, whose hydrophysical characteristics were determined on the base of the data on their granulometric composition, with duration of irrigation equal to 10 minutes are shown in Table 3.

Table 1

Results of simulation of pulse regime of subsurface drip irrigation with different fixed irrigation durations

Duration of watering	5 min	10 min	20 min	30 min
Irrigation rate, m ³ /ha	1.5	3	6	9
Root zone/moistened zone — depth, cm	16–24	13–27	10–30	7–33
Root zone/moistened zone — width, cm	8	16	20	26
Threshold for determining the moistened zone, kPa	0.4	0.6	0.6	0.5
Pipeline installation depth	20 cm			
The number of waterings per 10 days	479	252	144	102
Total volume of irrigation, m ³ /ha	664	761	842	902
Total evapotranspiration in 10 days, m ³ /ha	518			
Outflow below 1 m layer, m ³ /ha	328	364	405	436
Residual (accumulation or use of moisture reserves in 1 m layer with the influence of modeling errors), m ³ /ha	–181	–120	–80	–52

Table 2

Change in irrigation regimes with changes in evapotranspiration
(controlled zone determined for irrigation time of 10 min with evapotranspiration in 10 days at the level 518 m³/ha)

Total evapotranspiration in 10 days, m ³ /ha	345	690
Watering time, min	10	10.9
The number of waterings per 10 days	215	287
Total volume of irrigation, m ³ /ha	627	893
Outflow below 1 m layer, m ³ /ha	378	349
Residual (accumulation or use of moisture reserves in 1 m layer with the influence of modeling errors), m ³ /ha	–96	–146

Table 3

Results of simulation of pulse regime of subsurface drip irrigation for different soils (duration of irrigation – 10 min)

Soil	SMC	FC	α	n	K_f , cm/day	T_i , m ³ /ha	N_i	I_r , m ³ /ha	L
Silty heavily solodized soils on gleyed loess	50.3%	37.9%	0,017	1,267	1.41	730	249	3.0	29.0%
Sod gleyed solonchak soils on gleyed loess	63.0%	47.8%	0,029	1,241	1.74	769	262	3.0	32.6%
Sod, gleyed on surface, solodized soils on gleyed loess	59.6%	45.6%	0,026	1,233	1.43	726	237	3.0	28.6%
Chestnut salinized soils on loess	56.5%	42.3%	0,021	1,277	1.42	686	233	3.0	24.4%
Meadow–chernozem, gleyed on surface, slightly solodized soils on gleyed loess	51.9%	38.6%	0,015	1,306	1.29	663	226	3.0	21.8%
Chestnut medium solonetz on loess	49.4%	36.5%	0,014	1,319	1.26	651	222	3.0	20.4%
Dark–chestnut soils on loess	56.5%	41.9%	0,019	1,301	1.42	666	227	3.0	22.2%
Dark–chestnut salinized soils on loess	55.7%	41.6%	0,020	1,282	1.40	678	231	3.0	23.5%
Common deep low–humus chernozems on loess	61.4%	46.2%	0,026	1,257	1.76	759	248	3.0	31.7%
Common deep medium–humus chernozem on loess	58.2%	43.6%	0,022	1,274	1.52	701	239	3.0	26.1%
Common medium–depth low–humus chernozem on loess	55.4%	41.3%	0,020	1,287	1.43	681	232	3.0	23.9%
Low–depth chernozems on the eluvium of clay shale	51.6%	37.9%	0,017	1,330	1.41	649	221	3.0	20.1%
Low–depth chernozems on the eluvium of sandy shale	39.0%	29.2%	0,027	1,271	1.07	625	213	3.0	17.1%
Chernozems on the eluvium of clay shale	48.3%	35.9%	0,018	1,306	1.19	639	209	3.0	18.8%
Chernozems on the eluvium of sandstones	53.7%	38.8%	0,019	1,365	1.73	657	224	3.0	21.1%
Chernozems on the eluvium of sandy shale	40.0%	29.7%	0,025	1,286	0.96	584	199	3.0	11.2%
Chernozems on red clays	50.5%	40.3%	0,020	1,160	1.23	859	45	19.1	39.7%
Southern micellar–carbonate chernozems on loess	55.3%	41.8%	0,021	1,257	1.24	672	229	3.0	22.9%
Southern chernozems on loess	61.7%	46.2%	0,025	1,266	1.74	744	246	3.0	30.3%
Highly salinized alkaline chernozems on saline Paleogene clays	49.8%	38.8%	0,020	1,197	1.26	795	154	5.2	34.8%

* SMC – Saturated moisture content, FC – field capacity, K_f – filtration coefficient, T_i – Total irrigation volume for 10 days, N_i – Number of irrigations, I_r – Irrigation rate, L – Irrigation water losses.

Based on the simulation results, it can be concluded that outflows below the 1 m layer, which are the main cause of irrigation water losses in all simulated scenarios, are primarily correlated with the filtration coefficient ($R^2 = 0.6$) as well as with the volumetric moisture content value for field capacity ($R^2 = 0.7$).

At the same time, the modeled residual of water balance, which is defined as the accumulation or use of moisture reserves in 1 m soil layer, significantly correlates with water head value at the level of field capacity ($R^2 = 0.86$).

The total volume of irrigation shows the strongest correlation with the parameter n of van Genuchten model ($R^2 = 0.63$). However, this level of correlation is first of all provided by soils for which $n < 1.2$. Such values in the studied dataset correspond to absolute values of water heads at the level of field capacity more than 30 kPa and the situations when higher irrigation rates than the specified basic rate of 3 m³/ha are required to maintain moisture content in the range of 95–100% of field capacity. If we consider soils with $n \geq 1.2$, the total volume of irrigation has high correlation level with the same initial parameters as outflows below 1 m layer: the filtration coefficient ($R^2 = 0.65$) and the volumetric moisture content value for field capacity ($R^2 = 0.75$).

Considering the connection of the modeling results with hydrophysical properties of soils, particularly their filtration and water-holding capacity, we can state that on soils of heavy mechanical composition (heavy loams, clays) with low filtration and high water-holding capacity pulse regime of water supply to the moistened zones should maintain moisture level as close as possible to field capacity with relatively large irrigation rate per pulse and low frequency of pulses. On soils of light mechanical composition (sandy soils, sandy loams) with high filtration and low water-holding capacity in moistened zones it is necessary to maintain a lower level of moisture supply, but in the narrowest range (90–95 % of field capacity) that requires conducting irrigation at lower rates with higher frequency of pulses.

Conclusions. The determination of cost-effective design parameters of subsurface drip irrigation systems requires combined consideration in the optimization problem

of such factors as soil moisture transport, crop development, and variability of weather conditions. The proposed approach of solving this problem uses a genetic algorithm to find such a depth of irrigation pipelines installation and a distance between them that would ensure maintaining a given range of root zone moisture content with minimal costs for system construction and operation within a given period. Consideration of a series of randomly generated weather scenarios allows assessing the impact of possible extremes in weather conditions on the ability of the system to maintain the required level of moisture content and allows taking climate change into account.

We also propose to use a simplified optimization problem that allows significant reduction of execution time modeling irrigation scheduling only within a limited period when maximum level of water consumption is observed.

The performed computational experiments demonstrated the compliance of simulation results with the observations of the dynamics of moistening zones and general practice of SDIS design in the south of Ukraine.

Further development of the proposed technique is possible in the direction of its application to generate practical recommendations for growing different crops in different climatic zones and substantiation of design water supply regimes that allow achieving the maximum level of economic efficiency of irrigation.

Regarding the second considered problem – the justification of pulse irrigation regime under subsurface drip irrigation – we used the technique of modeling moisture transport based on the hypothesis that in this case root systems of plants develop first of all in the zones of active moistening. For a given duration of watering, the technique allows evaluating irrigation water losses, the use of moisture reserves, and system's resistance to changes in water demand, providing information about the efficiency of irrigation water use to decision-makers.

Modeling according to hydrophysical characteristics of 20 types of soils of Ukraine showed that the indicator that has the greatest correlation with the volume of irrigation is the parameter n of van Genuchten model. Water losses due

to outflow below 1 m layer correlate with the filtration coefficient of soil, while the use of moisture reserves is the smaller the lower is the value of water head that corresponds to the level of field capacity.

Thus, the determination of these three hydrophysical parameters (parameter n , filtration coefficient, and water head that corresponds to the level of field capacity) is, according to the results of mathematical modeling, critical for assessing the possibility of using pulse water supply regime for subsurface drip irrigation and its effectiveness.

In general, the obtained results strongly suggest that on soils with heavy mechanical composition subsurface drip irrigation with pulse regime should maintain a high level of moisture supply with a relatively large irrigation rate per pulse and low frequency of pulses. On soils with light mechanical composition, irrigation regime should have the opposite character – lower rates with higher frequency of pulses.

References

- abd el Baki, H.M., Fujimaki, H., Tokutomo, I., Saito, T. (2017). Determination of irrigation depths using a numerical model of crop growth and quantitative weather forecast and evaluation of its effect through a field experiment for potato. *J. Jpn. Soc. Soil Phys.*, 136, 15–24.
- Arbat, G., Puig-Bargués, J., Barragán, J., Bonany, J., Ramírez de Cartagena, F. (2008). Monitoring soil water status for micro-irrigation management versus modelling approach. *Biosystems Engineering*, 100(2), 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.008>
- Averyanov, S.F. (1982). Filtration from canals and its influence on groundwater regime. Moscow: Kolos. [in Russian]
- Campbell, G. S., Campbell, M. D., Hillel, D. (1982). Irrigation scheduling using soil moisture measurements: theory and practice. *Advances in irrigation*, 1, 25–42.
- Freund, R.W. (1993). A transpose-free quasi-minimal residual algorithm for non-hermitian linear systems. *SIAM J. Sci. Comput.*, 14(2), 470–482.
- Friedman, S.P., Communar, G., Gamliel A. (2016). DIDAS – User-friendly software package for assisting drip irrigation design and scheduling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 120, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.007>
- González Perea, R., Moreno, M.A., Ortega, J.F., del Castillo, A., Ballesteros R. (2020). Dynamic Simulation Tool of fertigation in drip irrigation subunits. *Computers and Electronics in Agriculture*, 173, 105434. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105434>
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- Holzappel, E.A., Marino, M.A., Valenzuela, A. (1990). Drip irrigation nonlinear optimization model. *J. Irrig. Drain Eng.*, 116(4), 479–496.
- Kandelous, M.M., Kamai, T., Vrugt, J.A., Šimůnek, J., Hanson, B., Hopmans, J.W. (2012). Evaluation of subsurface drip irrigation design and management parameters for alfalfa. *Agricultural Water Management*, 109, 81–93. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.02.009>

М. Ромащенко¹, д-р техн. наук, проф.
e-mail: mi.romashchenko@gmail.com

В. Богасно², канд. техн. наук, ст. наук. співроб.
e-mail: sewab@ukr.net

А. Сардак, наук. співроб.
e-mail: anastasiabilobrova1993@gmail.com

О. Никитюк, д-р екон. наук, проф.
e-mail: nmu_309@ukr.net

¹Інститут водних проблем і меліорації НААН,
вул. Васильківська 37, м. Київ, 03022, Україна;

²Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України,
просп. Академіка Глушкова 40, м. Київ, 03187, Україна

- Karimi, B., Karimi, N., Shiri, J., Sanikhani H. (2022). Modeling moisture redistribution of drip irrigation systems by soil and system parameters: regression-based approaches. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36, 157–172. <https://doi.org/10.1007/s00477-021-02031-y>
- Kim, D.H., Kim, J.S., Kwon, S.H. et al. (2021). Simulation of Soil Water Movement in Upland Soils Under Pulse Irrigation using HYDRUS-2D. *J. Biosyst. Eng.*, 46, 508–516. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00123-9>
- Mitchell, M. (1996). An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge, MA: MIT Press.
- Muñoz-Carpena, R., Dukes, M. (2005). Automatic Irrigation Based on Soil Moisture for Vegetable Crops. <http://doi.org/10.32473/edis-ae354-2005>
- Obaideen, K., Yousef, B., AlMallah, M., Tan, Y.Ch., Mahmoud, M., Jaber, H., Ramadan, M. (2022). An overview of smart irrigation systems using IoT. *Energy Nexus*, 7, 100124. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100124>
- Rank, P.H., Vishnu, B. (2021). Pulse drip irrigation: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 10(1), 125–130. <https://www.phytojournal.com/archives/2021/vol10issue1/PartB/9-5-544-506.pdf>
- Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318–333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>
- Ritchie, J.T., Nesmith, D.S. (1991). Temperature and Crop Development. In: J. Hanks and J.T. Ritchie (Eds.) Modeling Plant and Soil Systems. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr31.c2>
- Romashchenko, M., Bohaienko, V., Bilobrova, A. (2021a). Two-dimensional mathematical modelling of soil water regime under drip irrigation. *Bulletin of Agricultural Science*, 99(4), 59–66. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202104-08> [in Ukrainian]
- Romashchenko, M., Kolomiets, S., Bilobrova, A. (2019). Laboratory diagnostic system for water-physical soil properties. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 199–208. <https://doi.org/10.31073/mivg201902-193> [in Ukrainian]
- Romashchenko, M., Shatkovskiy, A., Sardak, A., Cherevichny, Y., Didenko, N., Marinkov, O. (2021b). Aspects of formation of soil water regime and water consumption of corn under subsurface drip irrigation. *Land Reclamation and Water Management*, (2), 190–200. <https://doi.org/10.31073/mivg202102-298> [in Ukrainian]
- Romashchenko, M.I., Shatkovsky, A.P., Onotsky, V.V. (2016). Mathematical model of flat-vertical profile moisture transfer under trickle irrigation in conditions of incomplete saturation. *Agricultural science and practice*, 3(3), 35–40. <https://doi.org/10.15407/agrisp3.03.035>
- Samarskii, A.A. (2001). The theory of difference schemes. New York (NY): CRC Press.
- Segal, E., Ben-Gal, A., Shani, U. (2006). Root Water Uptake Efficiency Under Ultra-High Irrigation Frequency. *Plant Soil*, 282, 333–341. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-0003-6>
- Seidel, S.J., Schütze, N., Fahle, M., Mailhol, J.-C., Ruelle, P. (2015). Optimal Irrigation Scheduling, Irrigation Control and Drip Line Layout to Increase Water Productivity and Profit in Subsurface Drip-Irrigated Agriculture. *Irrig. and Drain.*, 64, 501–518. <https://doi.org/10.1002/ird.1926>
- Shiri, J., Karimi, B., Karimi, N., Kazemi, M.H., Karimi, S. (2020) Simulating wetting front dimensions of drip irrigation systems: Multi criteria assessment of soft computing models. *Journal of Hydrology*, 585, 124792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124792>
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892±8.

Надійшла до редколегії 16.09.22

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМ ПІДГРУНТОВОГО КРАПЛИННОГО ЗРОШЕННЯ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ

Розглянуто задачу визначення глибини закладання краплинних стрічок та відстані між ними під час проєктування систем підгрунтового краплинного зрошення (СПКЗ), а також задачу оцінки ефективності імпульсного режиму водоподачі. Відповідна оптимізаційна задача має як цільову функцію витрати на створення та експлуатацію системи і розв'язується генетичним алгоритмом. Для кожного з набору значень параметрів системи моделюється призначення поливів протягом сезону вегетації згідно із заданим передполивним порогом. Моделювання проводиться на основі двовимірного рівняння Річардса, дискретизованого скінченно-різницевою схемою. Для цього параметри розвитку рослин визначаються згідно з моделлю, що базується на зміні фаз розвитку при накопиченні заданої суми активних температур. Для врахування варіативності погодних умов, моделювання проводиться для серії випадково згенерованих метеосценаріїв. Результати тестування розробленої методики підтверджують її відповідність експериментальним спостереженням та практиці проєктування систем підгрунтового краплинного зрошення.

Ключові слова: підгрунтове краплинне зрошення, імпульсний режим водоподачі, вологоперенесення, моделювання, оптимізація.

УДК 556.38

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.101.16>

Н. Люта, канд. геол.-мінералог. наук

e-mail: nlyuta@ur.netКиївський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ ТРІЩИНУВАТОЇ ЗОНИ КРИСТАЛІЧНИХ ПОРІД (ГІДРОГЕОЛОГІЧНА ОБЛАСТЬ УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА)

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Внаслідок російської агресії у 2022 році загострилася проблема забезпечення населення України питною водою з різних джерел. Підземні води порівняно з поверхневими мають низку переваг, передусім – захищеність від забруднення та наближеність до споживача. Наразі необхідно диверсифікувати джерела водопостачання населення, задіяти всі основні водонасичені горизонти і комплекси, що містять воду питної якості. Однак ресурси підземних вод розподілені по території України вкрай нерівномірно – більша частина зосереджена в північних і західних областях, а ресурси південних областей обмежені. Крім того, основні водонасичені горизонти території України характеризуються строкатим хімічним складом, зумовленим природними і антропогенними чинниками їхнього формування. Значну частину України займає Український щит, природні умови якого не сприяють формуванню значних ресурсів підземних вод. Метою дослідження є аналіз якісного стану та оцінка освоєності запасів підземних вод у тріщинуватій зоні кристалічних порід архею-протерозою. Для цього було зібрано та проаналізовано інформацію щодо використання та хімічного складу підземних вод згаданого горизонту. У результаті було виявлено закономірності просторового розподілу макрокомпонентів у підземних водах водонасиченого горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід. Ці закономірності рекомендовано враховувати у процесі моніторингу підземних вод та їхнього господарсько-питного використання. Незважаючи на вкрай нерівномірне поширення і строкатий хімічний склад, у більшості розглянутих областей існують перспективи значного збільшення видобутку підземних вод з водонасиченого горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід.

Ключові слова: Гідрогеологічна область Українського щита, зона тріщинуватості, водонасичений горизонт, видобуток підземних вод, якісний стан підземних вод, мінералізація.

Постановка проблеми. В умовах воєнної агресії у низці регіонів надзвичайно гостро стало питання забезпечення населення питною водою. Стало очевидним, що водопостачання повинне здійснюватися з різних джерел, причому основними з них повинні бути захищені від забруднення підземні води. У той же час низка південних регіонів України, у тому числі розташовані там індустріальні центри – Дніпро, Запоріжжя, Кривий Ріг, Кам'янське, Енергодар та інші, постачаються водою винятково за рахунок поверхневих вод. Ця ситуація значною мірою пояснюється складними гідрогеологічними умовами, що не сприяють формуванню значних ресурсів підземних вод у кристалічних породах Українського щита.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Питання особливостей формування хімічного складу підземних вод кристалічних порід Українського щита розглядалися дослідниками у попередні роки (Руденко, Попов, 1975; Бабинець та ін., 1979), які відзначали існування закономірностей у розподілі підземних вод тріщинуватої зони за мінералізацією і хімічним складом, і пояснювали формування хімічного складу тектонічними, структурно-петрографічними особливостями різних ділянок, хімічним і мінералогічним складом порід, палеогеографічними і сучасними кліматичними умовами. У подальшому низка публікацій була присвячена питанням обводненості кристалічних порід Українського щита, підвищенню результативності буріння свердловин поповнення (Лютый та ін., 2016) та штучному поповненню ресурсів горизонту (Петренко, 2018). В останні роки актуальним питанням водопостачання населених пунктів України за рахунок підземних вод, пошукам резервних джерел водопостачання були присвячені публікації провідних українських учених (Шестопалов та ін., 2018, 2020).

Метою дослідження є аналіз якісного стану підземних вод водонасиченого горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід архею-протерозою, освоєності запасів підземних вод горизонту, а також перспектив збільшення їхнього видобутку. Для цього було зібрано та

проаналізовано інформацію щодо використання та макрокомпонентного складу вод згаданого горизонту.

Аналіз природних умов формування ресурсів підземних вод. Гідрогеологічна область Українського щита (ГОУЩ) розташована у центральній частині України й охоплює території Житомирської, Вінницької, Кіровоградської і, частково, Рівненської, Хмельницької, Київської, Дніпропетровської, Черкаської, Одеської, Миколаївської, Запорізької та Донецької областей.

ГОУЩ належить до найменш водозабачених регіонів України. Із загальних прогнозних ресурсів підземних вод України 61689,2 тис. м³/д ГОУЩ належить лише 4426,5 тис. м³/д або 7,2 %. З 4 426,5 тис. м³/д більшу частину складають ресурси підземних вод у зоні тріщинуватості кристалічних порід архею-протерозою (1164,7 тис. м³/д), решта – у відкладах палеогену (1130,7 тис. м³/д), а також у четвертинних (981,5 тис. м³/д), неогенових (702,4 тис. м³/д), крейдових (435,2 тис. м³/д) і юрських відкладах (12,0 тис. м³/д) (Стан підземних вод, 2021).

У межах ГОУЩ водонасичений горизонт у тріщинуватій зоні порід архею-протерозою є основним джерелом господарсько-питного водопостачання низки населених пунктів (численні райцентри Рівненської, Житомирської, Кіровоградської, Київської, Дніпропетровської областей). Загальний видобуток підземних вод на території ГОУЩ складається з видобутку з осадової товщі (32 %) і з тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію (68 %). З урахуванням специфіки обводненості кристалічних порід експлуатація здійснюється невеликими розосередженими водозаборами невеликої продуктивності (до 1–2 тис. м³/д).

Водовмісні породи водонасиченого горизонту у зоні тріщинуватості кристалічних порід архею-протерозою представлені гранітами, мігматитами та гнейсами. По долинах річок кристалічні породи виходять на земну поверхню або перекриваються малопотужним шаром мезо-кайнозойських відкладів. Найбільш обводнені зони приурочені до понижених ділянок сучасного рельєфу, що

© Люта Н., 2023

збігаються з розвинутою гідрографічною мережею та крупними балками. Потужність зон інтенсивної тріщинуватості часто не перевищує 20 м від поверхні кристалічних порід на вододілах та 50 м у долинах річок і поширюється зазвичай на глибину 80–100 м від сучасної поверхні.

Живлення водоносного горизонту відбувається за рахунок інфільтрації атмосферних опадів, а також перетікання з водоносних горизонтів, приурочених до порід осадового чохла в місцях відсутності водотривів. Розвантаження відбувається в долинах річок.

Майже повсюдно кристалічні породи перекриті корою вивітрювання, яка визначає умови їхнього взаємозв'язку з водоносними горизонтами і комплексами осадових відкладів, що залягають вище та, відповідно, умови живлення. Кора вивітрювання залежно від літологічного складу може бути або водоносним горизонтом, або відносним водотривом. У регіональному плані повний розріз і більша потужність кори вивітрювання спостерігається на вододільних ділянках, до прируслових частин її потужність зменшується, аж до повного розмиву (Гошовський та ін., 2018).

Будучи крупною позитивною структурою, гідрогеологічний масив – Український щит забезпечує формування поверхневого і підземного стоків, спрямованих у бік прилеглих до нього артезіанських басейнів.

Якісний склад підземних вод зумовлений умовами формування їхніх ресурсів. Особливістю водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід є те, що він, як і ґрунтові водоносні горизонти, живиться по всій площі його поширення.

Умови накопичення і циркуляції підземних вод у межах щита дуже неоднорідні. Північна частина ГОУЩ лежить у зоні надмірного зволоження, центральна і південно-східна – у зоні нестійкого зволоження, південна – у зоні недостатнього зволоження. Окрім зональних кліматичних відмінностей, територія ГОУЩ вкрай неоднорідна за розвитком тріщинуватості, а отже за обводненістю, яка на різних ділянках суттєво різниться як за площею, так і за глибиною.

Горизонту в тріщинній зоні кристалічних порід властиві неоднакові умови захищеності по площі його поширення. Залежно від потужності слабопроникних порід у покрівлі водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід архею-протерозою у різних частинах поширення є захищеним або умовно захищеним від забруднення з поверхні. На окремих ділянках існують умови для гідравлічного зв'язку з безнапірними водоносними горизонтами, що залягають вище за розрізом. Найчастіше горизонт є умовно захищеним у межах річкових долин, де він характеризується найбільшою водозбагаченістю (Гошовський та ін., 2018).

Методика досліджень. Дослідження виконано методом збору, аналізу та узагальнення інформації щодо якісного складу підземних вод водоносного горизонту у тріщинуватій зоні порід Українського щита, даних стосовно вмісту забруднень у підземних водах та показників видобутку за останній період часу. Гідрогеохімічну інформацію проаналізовано з урахуванням кліматичних умов території Гідрогеологічної області Українського щита, показників захищеності досліджуваного водоносного горизонту та антропогенного навантаження.

Результати аналізу. Адміністративні області, розташовані в межах ГОУЩ, відзначаються різним кількісним та якісним станом підземних вод і різним ступенем їхньої освоєності (рис. 1 і 2).

Відповідно до інформації Державного балансу запасів корисних копалин (Державний баланс, 2017, 2021) у північній частині ГОУЩ, на території **Житомирської області**, водоносний горизонт тріщинуватих кристалічних порід є основним, на ньому базується централізоване водопостачання населених пунктів області, зокрема м. Бердичева та Коростишева. До цього водоносного горизонту приурочено близько 80 % ділянок із затвердженими експлуатаційними запасами і близько 60 % запасів підземних вод, а решта – до пісковиків і пісків юрського, крейдового, палеогенового і четвертинного віку.

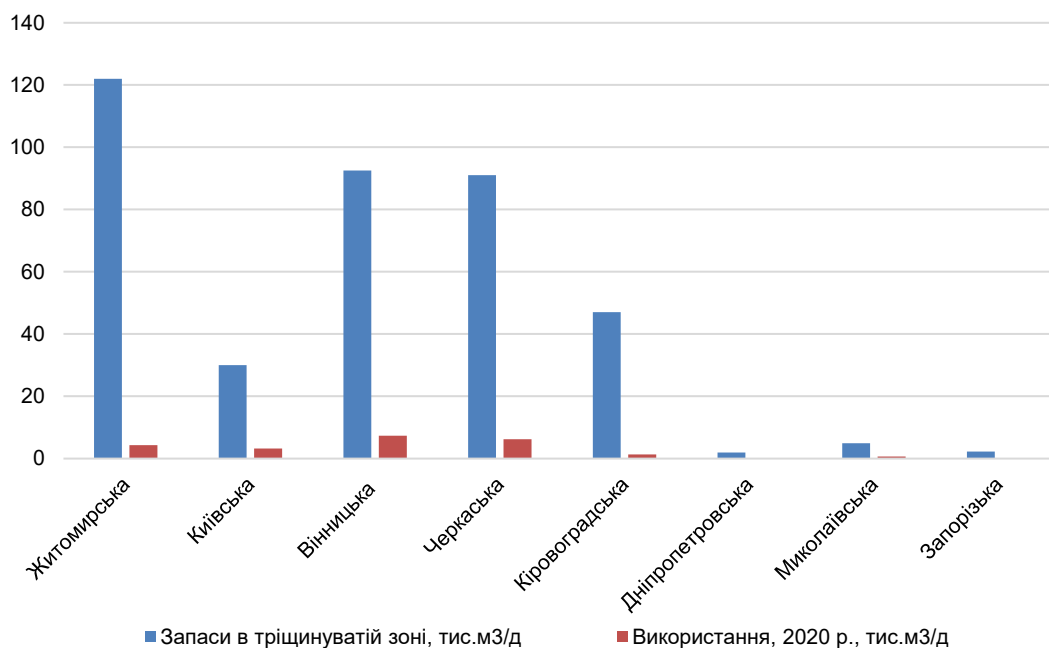


Рис. 1. Запаси та використання підземних вод водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід

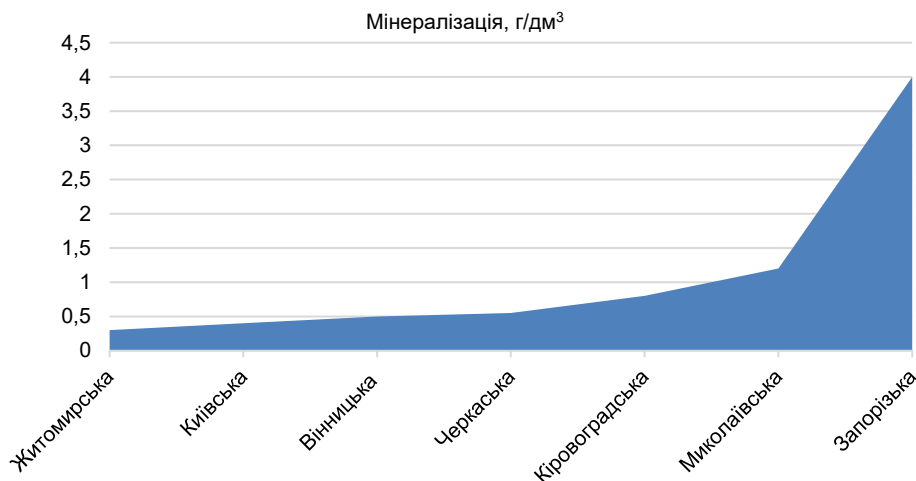


Рис. 2. Зміни мінералізації підземних вод водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід

Водовмісними породами є граніти, мігматити і гнейси. Мінералізація підземних вод у кристалічних породах тут низька, переважно до 0,5 г/дм³, причому нижня межа коливань мінералізації по свердловинах нерідко становить 0,1 г/дм³. Найнижча мінералізація переважно фіксується у свердловинах, що розкривають водоносний горизонт на незначній глибині – до 10 м. Хімічний склад води здебільшого гідрокарбонатний магнієво-кальцієвий, рідше гідрокарбонатний кальцієвий. До речовин, вміст яких перевищує гранично допустимі концентрації у воді на окремих водозаборах, належать залізо, марганець, амоній, кремній та нафтопродукти (*Стан підземних вод, 2021*). На окремих ділянках у підземних водах відзначається підвищений вміст радону.

Упродовж 2020 р. з 32 ділянок, розвіданих на водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід, видобуток проводився на 11, а із загальної суми запасів, приурочених саме до цього горизонту, було видобуто лише 3,5 %. Нечисленні дані щодо змін якісного стану підземних вод у процесі експлуатації водозаборів засвідчують, що ці зміни фіксувалися рідко і полягали в несуттєвому збільшенні мінералізації. Зважаючи на переважно добрий якісний стан підземних вод і незначну освоєність, перспективи нарощування видобутку підземних вод з тріщинуватої зони кристалічних порід у Житомирській області є дуже сприятливими. На **Київщині** водоносний горизонт у кристалічних породах експлуатується у південній частині області, його частка у загальних експлуатаційних запасах області незначна, вона становить менше 3 %, основна частина запасів міститься у гранулярних колекторах – відкладах четвертинного, палеогенового, крейдового та юрського віку. Водовмісними є граніти. Хімічний склад води гідрокарбонатний кальцієво-магнієвий, мінералізація переважно 0,3–0,5 г/дм³. До речовин, вміст яких перевищує гранично допустимі концентрації (*Стан підземних вод, 2021*), належать залізо та марганець. З-поміж 12 розвіданих ділянок видобуток у 2020 р. проводився на 7, обсяг видобутку становив 11 % від оцінених запасів родовищ, приурочених до досліджуваного водоносного горизонту. Води горизонту в кристалічних породах використовуються для водопостачання м. Сквир, Тараща і Тетіїв.

У межах **Вінницької області** водоносний горизонт у тріщинуватій зоні кристалічних порід має важливе значення – близько 60 % експлуатаційних запасів підземних вод області пов'язані саме з ним, решта – з водоносними

горизонтами у вапняках, пісках і пісковиках міоцену. Одночас через складну фільтраційну неоднорідність тріщинуватої зони кристалічних порід на значній частині Вінницької області запаси підземних вод не затверджені (*Лютый, Саніна, 2021*). Прогнозні ресурси підземних вод питної якості оцінені по Вінницькій області у кількості 885,5 тис. м³/д, а їхня розвіданість становить лише 16 %.

Водовмісними є граніти. Підземні води гідрокарбонатного магнієво-кальцієвого, рідше гідрокарбонатного кальцієвого і гідрокарбонатного кальцієво-магнієвого складу з мінералізацією 0,3–0,7 г/дм³. Подекуди у складі води збільшується вміст іонів натрію. У межах населених пунктів, особливо у м. Вінниці, відзначається збільшення мінералізації за рахунок іонів хлору, сульфатів і натрію внаслідок антропогенного впливу, однак показник мінералізації перевищує 1 г/дм³ лише в поодиноких випадках. У воді окремих водозаборів фіксуються забруднювальні речовини – нітрати і нафтопродукти, а також перевищення нормованого показника жорсткості.

Води горизонту в кристалічних породах використовуються для водопостачання міст Бершаді, Гайсина, Немирова, Липовця, Іллінців та ін. Нині близько половини розвіданих ділянок не експлуатуються, а загалом видобуток з горизонту становить лише 8 % запасів по області. Низка ділянок зі значними запасами (наприклад, ділянка Бузька поблизу Вінниці із запасами 13,9 тис. м³/д та у Гайсині із запасами 12,2 тис. м³/д) є незадіяними.

Слід зазначити, що джерелом централізованого водопостачання населення м. Вінниця є води р. Пд. Бугу, а підземні води тріщинуватої зони докембрійських порід використовуються для водопостачання промислових підприємств міста. І хоча через складні гідрогеологічні умови близько 40 % розвідувальних свердловин виявилися малодебітними і непридатними для видобутку, фахівці ДУ "Науково-інженерний центр радіогідрогеоекологічних полігонних досліджень НАН України" обґрунтували можливість водопостачання Вінниці виключно за рахунок підземних вод тріщинуватих кристалічних порід у разі виникнення надзвичайних ситуацій (*Шестопалов та ін., 2018*).

У цілому перспективи розв'язання проблем водопостачання населених пунктів області за рахунок підземних вод досить сприятливі, що, правда, це стосується не всієї території.

У **Черкаській області** частка водоносного горизонту у кристалічних породах в експлуатаційних запасах становить близько чверті. Водовмісні породи представлені

переважно мігматитами. Підземні води гідрокарбонатного кальцієво-магнієвого складу, на окремих водозаборах (с. Маньківка) – хлоридно-сульфатного магнієво-кальцієвого складу, мінералізація переважно 0,3–0,8 г/дм³, подекуди, на півдні області, до 1,3–1,5 г/дм³. Води горизонту використовуються для водопостачання міст Жашкова та Умані. У 2020 р. видобування проводилося на третині розвіданих ділянок, видобуток становив лише 7 % від затверджених запасів підземних вод, що належать до водоносного горизонту тріщинуватої зони кристалічних порід.

Кировоградська область найменш забезпечена ресурсами підземних вод через те, що вона цілком розташована в межах ГОУЩ та в зоні нестійкого зволоження. Частка водоносного горизонту у тріщинуватих породах докембрію становить 21 % затверджених експлуатаційних запасів області, решта запасів приурочена до четвертинних і еоценових відкладів осадового чохла. Водовмісні кристалічні породи – граніти і гнейси. Макрокомпонентний склад вод тут є більш строкатим, нерідко двокомпонентним аніонним і трикомпонентним катіонним. У воді половини водозаборів серед катіонів провідну роль відіграє натрій, часто відзначається значний вміст сульфат-іонів. Мінералізація стає ще трохи вищою – переважно 0,4–0,9 г/дм³, нерідко перевищує 1 г/дм³. До речовин, вміст яких перевищує ГДК, належать аміак і пестициди.

Водоносний горизонт у кристалічних породах використовується для водопостачання смт Голованівськ та Завалля. З розвіданих на підземні води досліджуваного горизонту ділянок у 2020 р. видобування проводилося менш ніж на половині, обсяг видобутку становив менш як 3 % від затверджених запасів.

У **Дніпропетровській області** основні водоносні горизонти приурочені до четвертинних алювіальних та палеогенових відкладів, а роль водоносного горизонту в кристалічних породах незначна. До цього водоносного горизонту приурочено менше 0,3 % експлуатаційних запасів області. Єдине розвідане Ігринське родовище не експлуатується. Підземні води родовища приурочені до гранітів, за складом сульфатно-гідрокарбонатні натрієво-кальцієві з мінералізацією 0,5–0,72 г/дм³. На значній частині території області в межах ГОУЩ експлуатаційні запаси підземних вод не розвідувались і не затверджувались через слабку проникність і складну фільтраційну неоднорідність кристалічних порід (Лютій, Саніна, 2021).

На **Миколаївщині** водоносний горизонт у кристалічних породах розвинутий у північній частині області. Частка цього водоносного горизонту становить 5 % від затверджених експлуатаційних запасів області, основна частина запасів приурочена до четвертинних алювіальних відкладів міоценових вапняків та еоценових і верхньокрейдових пісків. Водовмісні кристалічні породи – гнейси. Запаси затверджені по двох ділянках. Одна свердловина використовується для водопостачання населення смт Криве Озеро, запаси становлять 3,9 тис. м³/д, хімічний склад води хлоридно-сульфатно-гідрокарбонатний кальцієво-магнієво-натрієвий, мінералізація 0,6–0,9 г/дм³. Друга ділянка розташована у Первомайському районі, вода використовується для потреб промислового підприємства. Запаси 0,969 тис. м³/д, вода гідрокарбонатно-сульфатна магнієво-кальцієва, мінералізація 0,61–1,52 г/дм³. Видобуток у 2020 р. сягав близько 13 % від затверджених запасів. Характерними забруднювальними речовинами підземних вод в області є типові для аграрних регіонів нітрати, нітрити та амоній (Стан підземних вод, 2021).

У межах ГОУЩ в **Запорізькій області** водоносний горизонт практично не вивчався і запаси не оцінювалися, очевидно, у зв'язку з низькою якістю підземних вод (Лютій, Саніна, 2012). Нині проблема господарського водопостачання у східній частині Запорізької області розв'язується за рахунок водоносних горизонтів у відкладах неогену, нижнього, середнього і верхнього палеогену та верхньої крейди. Водовмісними породами всіх горизонтів є різнозернисті та дрібнозернисті піски. Єдине Васинівське родовище, по якому оцінено запаси підземних вод у неогенових і протерозойських породах, містить підземні води у протерозойських гнейсах хлоридно-гідрокарбонатного кальцієво-магнієвого складу з мінералізацією 4,0–4,3 г/дм³.

На півдні **Донецької області** мінералізація підземних вод у докембрійських кристалічних породах становить переважно 3,0–5,0 г/дм³ подекуди сягаючи 8 г/дм³ і більше (Шестопалов, 2020; Камзіст, Шевченко, 2009).

Очевидно, з урахуванням широкого впровадження нових технологій очищення води, зокрема методом зворотного осмосу, підходи до освоєння ресурсів підземних вод у південних регіонах можуть бути переглянуті (Лютій, 2016).

Аналіз просторового поширення вод різного макрокомпонентного складу і мінералізації однозначно свідчить про пріоритетність природних чинників у їхньому формуванні. Водночас суттєвого впливу мінералогічного складу водовмісних кристалічних порід на формування макрокомпонентного складу підземних вод не виявлено. Натомість визначальним є кліматичний чинник, насамперед кількість опадів, оскільки території з підземними водами з мінералізацією понад 1 г/дм³ і зміною гідрокарбонатного складу на строкатий зі збільшенням ролі сульфатів і хлоридів, впевнено відзначаються за зміни агрокліматичної зони недостатнього зволоження на помірно посушливу або південніше ізогієти 550 мм/рік. Із кліматичним чинником прямо пов'язана зміна Лісостепової зони з переважанням сірих лісових ґрунтів на Степу з панівними чорноземами. На цих же широтах відбувається зміна перших від поверхні безнапірних водоносних горизонтів в алювіальних і флювіогляціальних четвертинних відкладах на водоносні горизонти в еолово-делювіальних відкладах такого ж віку. Все це підтверджує підпорядкування хімічного складу вод у кристалічних породах природній географічній гідрохімічній зональності та їхній тісний зв'язок з поверхневими і ґрунтовими водами (рис. 3).

За даними ДНВП "Геоінформ", у водах тріщинуватої зони кристалічних порід докембрію відзначається низка речовин, вміст яких перевищує нормативні показники, встановлені ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною". Ці елементи і сполуки мають як природне, так і антропогенне походження.

Часто елементи і сполуки природного походження мають значне поширення і потужні природні джерела надходження, тому поліпшення якості вод можливе лише шляхом застосування відповідної водопідготовки. До речовин природного походження належать залізо та марганець, які містять збагачені на органічні речовини ґрунтові води гумідної зони. Власне, недостатня захищеність водоносного горизонту кристалічних порід у Поліській зоні (особливо в межах суббасейну Прип'яті) і гідравлічний зв'язок із залеглими вище за розрізом ґрунтовими водами зумовили площинний характер поширення вод із понаднормовим вмістом заліза та марганцю.

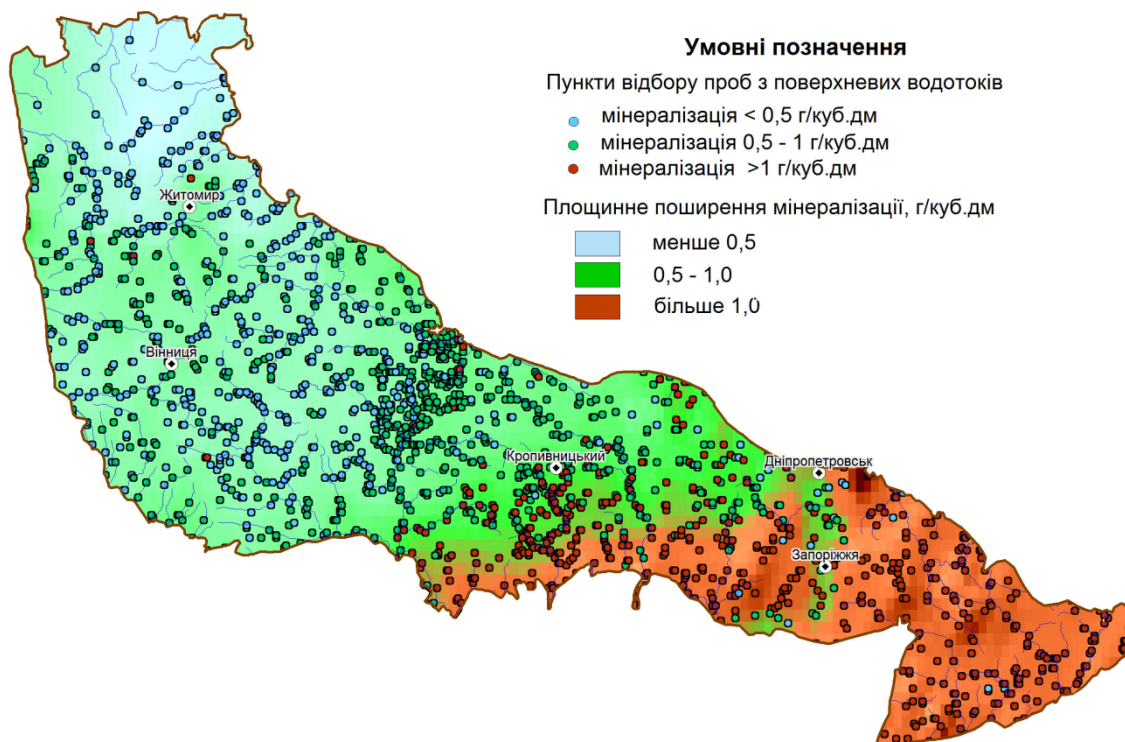


Рис. 3. Мінералізація поверхневих вод на території ГОУШ

Характерним для підземних вод у кристалічних породах є підвищений вміст радону, який залежить від складу і тріщинуватості порід, тому його слід обов'язково контролювати на відповідність Нормам радіаційної безпеки України (НРБУ-97, п.8.6.4). З іншого боку, до водоносного горизонту у зоні тріщинуватості приурочено низку родовищ радонових мінеральних вод. Ці родовища розташовані у Вінницькій, Житомирській, Київській, Рівненській, Хмельницькій, Кіровоградській та Дніпропетровській областях. Нині загалом на балансі перебуває 29 ділянок, 6 з яких не експлуатуються. Видобуток радонових вод сьогодні не перевищує 5–10% від затверджених запасів. Перспективи виявлення нових родовищ і нарощування видобутку радонових мінеральних вод на існуючих родовищах дуже великі.

Природне походження також і понаднормового вмісту кремнію, що надходить у воду внаслідок вивітрювання силікатів. У цьому контексті слід зауважити, що чинний норматив вмісту кремнію в ДСанПІН 2.2.4-171-10 – 10 мг/дм³ давно є дискусійним, формально перенесеним з колишніх радянських документів і таким, що не має достатнього експериментального обґрунтування (Мокиєнко, 2020). Кремній є нетоксичним, він не накопичується в організмі людини. Зрештою, кремній не нормується в європейських документах, очевидно, скасування цього нормативу є питанням часу.

Щодо підвищеного вмісту амонію, то він у підземних водах може мати як антропогенне, так і природне походження. Підвищений вміст амонію в підземних водах у кристалічних породах на території Житомирщини і Київщини найчастіше зумовлений наявністю серед перекирваних порід прошарків, збагачених органічною речовиною (торф, болотні та озерні відклади), яка зазнає розкладу в анаеробних умовах, у результаті чого іони амонію збагачують підземні води. У південних регіонах амоній найчастіше має антропогенне походження і пов'язаний із внесенням органічних і азотних добрив у межах агроландшафтів.

На територіях як північних, так і південних областей відзначаються випадки забруднення підземних вод у тріщинуватій зоні кристалічних порід нітратами і пестицидами. Оскільки ґрунтові води в межах агроландшафтів забруднені нітратами повсюдно, то, зважаючи на їхній тісний зв'язок з підземними водами досліджуваного горизонту, це забруднення викликає особливе занепокоєння.

Висновки. Як кількісний, так і якісний стан підземних вод досліджуваного водоносного горизонту за площею його поширення є вкрай нерівномірним, і якщо кількість залежить від наявності зон тріщинуватості і обводненості території, віддаленості від поверхневих водних об'єктів, то якість залежить передусім від якості поверхневих і ґрунтових вод, яка, у свою чергу, визначається насамперед обсягами інфільтраційного живлення.

Макрокомпонентний склад вод у тріщинуватій зоні кристалічних порід підпорядковується субширотній зональності, що проявляється в закономірному збільшенні мінералізації підземних вод горизонту з 0,1–0,5 г/дм³ на північному заході до понад 4 г/дм³ на південному сході, що узгоджується з якісним станом ґрунтових і поверхневих вод (рис. 3). У цьому ж напрямку змінюється хімічний склад води з гідрокарбонатного кальцієвого до строкатого, із провідною роллю іонів хлору, сульфатів і натрію. Перевищення нормованого показника мінералізації 1 г/дм³ і зміна аніонного гідрокарбонатного складу на строкатий спостерігається за зміни агрокліматичної зони недостатнього зволоження на помірно посушливу.

Тісний зв'язок підземних вод у кристалічних породах із ґрунтовими і поверхневими водами, що зумовлює зональність, спричиняє і потрапляння забруднювальних речовин у води в кристалічних породах з поверхні, особливо у місцях відсутності водотривів.

Нерівномірний характер тріщинуватості, локальний характер тріщинуватих зон обмежує поширення забруднювальних речовин за площею. Тому значне площинне поширення у водах зони тріщинуватості властиве лише тим компонентам, які мають природне походження і

регіональний характер розповсюдження у суміжних компонентах ГС і доквілля, або ж зумовлене впливом дифузних джерел забруднення з поверхні. Перше стосується підвищеного вмісту заліза і марганцю у підземних водах Полісся, а друге – забруднення нітратами на територіях агроландшафтів.

Уразливість підземних вод у кристалічних породах до забруднення зумовлює необхідність вивчення якості підземних вод кристалічних порід у моніторинговому режимі з обов'язковим дослідженням вмісту елементів і сполук, властивих поверхневою забрудненню.

Незважаючи на вкрай нерівномірне поширення і строкатий хімічний склад, у більшості розглянутих областей існують перспективи значного збільшення видобутку підземних вод з водоносного горизонту у тріщинуватій зоні кристалічних порід. Обсяг видобутку з експлуатаційних запасів підземних вод у тріщинуватій зоні кристалічних порід архео-протерозою у 2020 р. в межах північних і центральних областей становив лише 3–11 %.

Щодо південних областей, де розвіданість підземних вод у кристалічних породах є низькою через недостатню кількість і незадовільну якість води, перспективи їхнього видобування слід оцінювати в кожному окремому випадку з урахуванням існуючих альтернативних джерел як поверхневих вод, так і водоносних горизонтів осадового чохла. Зважаючи на нинішню ситуацію, очевидно, слід коригувати підходи щодо освоєння підземних вод і розглядати перспективи використання всіх можливих джерел водопостачання, у тому числі максимально наближених до споживача водозаборів підземних вод з незначними запасами і високою мінералізацією води, з урахуванням можливостей сучасних технологій очищення води і доведення її якості до вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Список використаних джерел

- Бабинец, А.Е., Боровский, Б.В., Шестопапов, В.М. (1979). Формирование эксплуатационных ресурсов подземных вод платформенных структур Украины. Киев: Наук. думка, 216 с.
- Гошовський, С., Саніна, І., Люта, Н. (2018). Ідентифікація і розмежування масивів підземних вод у басейні річки Дніпро, Україна. Київ, 114 с.
- Державний баланс корисних копалин України. Питні підземні води. (2017). ДНВП "Геоінформ України".
- Державний баланс корисних копалин України. Питні підземні води. (2021). ДНВП "Геоінформ України".
- Камзіст, Ж.С., Шевченко, О.Л. (2009). Гідрогеологія України. Київ: ІНКОС, 614 с.
- Лютій, Г.Г. (2016). Картографічне оцінювання змін якості підземних вод у часі. *Збірник наукових праць УкрДГРІ*, 1, 65–71.

Лютій, Г.Г., Саніна, І.В. (2021). Розроблення та наукове обґрунтування системи моніторингу експлуатаційних запасів підземних питних вод державного рівня. *Звіт УкрДГРІ*. Київ.

Лютій, Г.Г., Саніна, І.В., Люта, Н.Г. (2016). Методичні засади підвищення результативності буріння експлуатаційних свердловин на воду в складних умовах Українського щита. *Мінеральні ресурси України*, 1, 16–22.

Мокиєнко, А.В. (2020). Кремний в воде. Гигиенические и медико-биологические аспекты. Одесса: Фенікс, 206 с.

Петренко, Л.И. (2018). Возможности искусственного пополнения подземных вод кристаллических пород для водоснабжения. *Геологический журнал*, 2 (363), 23–32.

Руденко, Ф.А., Попов, О.Е. (1975). Гідрогеологія. Київ.

Стан підземних вод. (2021). Щорічник. Київ: Державна служба геології та надр України, ДНВП "Державний інформаційний геологічний фонд України", 124 с.

Шестопапов, В.М., Стеценко, Б.Д., Руденко, Ю.Ф. (2018). Підземні води тріщинуватих кристалічних порід, як резервне джерело питного водозабезпечення Вінниці (Україна). *Геологічний журнал*, 1 (362), 5–16. doi:10.30836/igs.1025-6814.2018.1.126414

Шестопапов, В.М., Стеценко, Б.Д., Руденко, Ю.Ф. (2020). Проблеми питного водозабезпечення Маріуполя і пропозиції щодо їх вирішення за рахунок підземних вод. *Геологічний журнал*, 1, 3–16.

References

- Babinets A.E., Borevsky B.V., Shestopalov, V.M. (1979). Formation of operational resources of groundwater of platform structures of Ukraine. Kyiv: Nauk. dumka, 216 p. [in Russian]
- Goshovsky, S., Sanina, I., Lyuta, N. (2018). Identification and delineation of groundwater arrays in the Dnieper River basin, Ukraine. Kyiv, 114 p. [in Ukrainian]
- Kamzist, J.S., Shevchenko, O.L. (2009). Hydrogeology of Ukraine. Kyiv: INKOS, 614 p. [in Ukrainian]
- Lyutyi, G.G., Sanina, I.V. (2021). Development and scientific substantiation of drinking groundwater operational reserves monitoring system of the state level. *Report UkrSRI*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Lyutyi, G.G., Sanina, I.V., Lyuta, N.G. (2016). Methodical bases of raising the efficiency of water wells drilling in difficult conditions of the Ukrainian shield. *Mineral resources of Ukraine*, 1, 16–22. [in Ukrainian]
- Lyutyi, G.G. (2016). The cartographic assessment of temporal changes of groundwater quality. *Zbiryk naukovykh prats UkrDHR*, 1, 65–71. [in Ukrainian]
- Mokienko, A.V. (2020). Silicon in the water. Hygienic and medico-biological nuances. Odessa: Phoenix, 206 p. [in Russian]
- Petrenko, L.I. (2018). Possibilities of artificial groundwater recharge of crystalline rocks for water supply. *Geological Journal*, 2(363), 23–32. [in Ukrainian]
- Rudenko, F.A., Popov, O.E. (1975). Hydrogeology. Kyiv. [in Ukrainian]
- Shestopalov, V.M., Stetsenko, B.D., Rudenko, Y.F. (2018). Underground waters of fractured crystalline rocks as a reserve source of drinking water supply of Vinnitsa (Ukraine). *Geological Journal*, 1 (362), 5–16. doi:10.30836/igs.1025-6814.2018.1.126414 [in Ukrainian]
- Shestopalov, V.M., Stetsenko, B.D., Rudenko, Y.F. (2020). Problems of drinking water supply of Mariupol and proposals for their solution at the expense of groundwater. *Geological journal*, 1, 3–16. [in Ukrainian]
- State Balance of Mineral Resources of Ukraine. Drinking groundwater. (2017). SNPP Geoinform of Ukraine. [in Ukrainian]
- State balance of minerals of Ukraine. Drinking groundwater. (2021). SNPP "Geoinform of Ukraine". [in Ukrainian]
- The State of Groundwater. (2021). Yearbook. Kyiv: State Service of Geology and Mineral Resources of Ukraine, State Geological Information Fund of Ukraine, 124 p. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 24.10.22

N. Lyuta, PhD (Geol.)
e-mail: nlyuta@ukr.net
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylyvska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

STATE AND PROSPECTS OF GROUNDWATER USE IN THE AQUIFER OF THE FRACTURED ZONE OF CRYSTALLINE ROCKS

As a result of the aggression of the neighboring state, the problem of providing the population of Ukraine with drinking water from different sources became more acute. Groundwater in this sense compared to surface water has a number of advantages, especially protection from pollution and proximity to the consumer. It is necessary to diversify the sources of water supply to the population, to use all principle aquifers containing water of drinking quality. However, groundwater resources are distributed very unevenly over the territory of Ukraine – most of them are concentrated in the northern and western regions, while resources in the southern regions are limited. In addition, the main aquifers of the territory of Ukraine are characterized by a complex chemical composition, determined by natural and anthropogenic factors. A large part of Ukraine is occupied by the Ukrainian shield, the natural conditions of which do not contribute to the formation of significant groundwater resources. The aim of the study is to analyze the qualitative state of groundwater aquifer in the fractured zone of the Archean-Proterozoic crystalline rocks. For this purpose, information on the use and groundwater quality composition of the studied aquifer was collected and analyzed. As a result, patterns of spatial distribution of macro-components in groundwater aquifer in the fractured zone of crystalline rocks were found. These regularities are recommended to take into account in the process of groundwater monitoring and its economic and drinking use. Despite the extremely uneven distribution of groundwater in the fractured zone of crystalline rocks, in most areas there are prospects for a significant increase in groundwater production from this aquifer.

Keywords: Hydrogeological area of the Ukrainian Shield, fractured zone, aquifers, groundwater extraction, groundwater status, salinity.

Наукове видання



ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 2(101)

Комп'ютерна обробка статей О. Козіонова
Computer processing of the articles by O. Kozionova

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

Автори опублікованих матеріалів несуть повну відповідальність за підбір, точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, відповідної галузевої термінології, власних імен та інших відомостей. Редколегія залишає за собою право скорочувати та редагувати подані матеріали.

Opinions, statements, accuracy of the quotations, economic and statistical data, terminology, proper names and other information are made on the responsibility of the authors. The Editorial Board reserves the right to shorten and edit the submitted materials.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 13,6. Наклад 300. Зам. № 223-10683.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл2.
Підписано до друку 30.06.23

Видавець і виготовлювач
ВПЦ "Київський університет"
Б-р Тараса Шевченка 14, м. Київ, 01030
☎ (38044) 239 32 22; (38044) 239 31 72; 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