

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib 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, Academic Resource Index ResearchBib and Google Scholar. Rank A of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Приведены результаты геологических, стратиграфических, палеонтологических, гидрогеологических, геофизических и геоинформационных исследований.

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib и Google Scholar. Категория А Министерства образования и науки Украины

Відповідальний за випуск О.І. Меньшов

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР**РЕДАКЦІЙНА
КОЛЕГІЯ**

В.А. Михайлов, д-р геол. наук, проф.

І.М. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб. (заст. головн. ред.); О.І. Меньшов, д-р геол. наук (відп. секр.); В.Г. Бахмутов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; С.А. Вижва, д-р геол. наук, проф.; З.О. Вижва, д-р фіз.-мат. наук, проф.; В.М. Гулій, д-р геол. наук, проф.; О.В. Дубина, д-р геол. наук, В.М. Загнітко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; В.І. Зацерковний, д-р техн. наук, проф.; О.М. Іванік, д-р геол. наук, проф.; О.М. Карпенко, д-р геол. наук, проф.; М.М. Коржнев, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; І.М. Корчагін, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; О.Є. Кошляков, д-р геол. наук, проф.; В.Г. Лозицький, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; Б.П. Маслов, д-р фіз.-мат. наук, проф.; О.В. Митрохин, д-р геол. наук, проф.; П.О. Міненко, д-р фіз.-мат. наук, проф.; Г.П. Міліневський, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб.; В.А. Нестеровський, д-р геол. наук, проф.; В.В. Огар, д-р геол. наук, проф.; М.І. Орлюк, д-р геол. наук, проф.; О.Л. Шевченко, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.; В.В. Шевчук, д-р геол.-мінералог. наук, проф.; С.Є. Шнюков, д-р геол. наук, доц.; Т.В. Пастушенко, канд. філол. наук, доц.; Т.А. 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; Г. Кулієв, Інститут геології та геофізики НАН Азербайджану; 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-22, 03022
☎ 380442597030, електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net;
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/>

Затверджено

Вченою радою ННІ "Інститут геології"
14 травня 2020 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 № 23534-13374 від 08.08.18

**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

кімн. 43, 6-р Тараса Шевченка, 14, Київ, 01030,
☎ (38044) 239 31 72, 239 32 22; 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, Academic Resource Index ResearchBib and Google Scholar. Rank A of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib та Google Scholar. Категорія А Міністерства освіти і науки України.

Приведены результаты геологических, стратиграфических, палеонтологических, гидрогеологических, геофизических и геоинформационных исследований.

Для преподавателей, научных сотрудников, аспирантов и студентов.

Издание индексируется в наукометрических базах данных Web of Science, Academic Resource Index ResearchBib и Google Scholar. Категория А Министерства образования и науки Украины.

Chief publication manager O. Menshov

EDITOR-IN-CHIEF

EDITORIAL BOARD

V. Mykhailov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.

Ukrainian Members:

I. Bezrodna, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher (Deputy Editor-in-Chief); O. Menshov, Dr. Sci. (Geol.), (Executive Secretary); V. Bakhmutov, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher; S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Z. Vyzhva, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; V. Guliy, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; O. Dubyna, Dr. Sci. (Geol.); 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.; M. Korzhnev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.; I. Korchagin, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; O. Koshliakov, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; Prof.; V. Lozitsky, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher; B. Maslov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.; O. Mytrokhin, Dr. Sci. (Geol.), Prof.; P. Minenko, Dr. Sci. (Phys.-Math.), 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.), Assoc. Prof.; T. Pastushenko, Cand. Sci. (Phil.), Assoc. Prof.; T. Mironchuk, Cand. Sci. (Phil.), Assoc. Prof.

Foreign members:

T. Dindaroğlu, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Turkey; H. Guliyev, Institute of Geology and Geophysics of ANAS, Azerbaijan; 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 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine,
tel. +380442597030, e-mail: geolvisnyk@ukr.net;
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua/>

Approved by the

Academic Council of the Institute of Geology
May 14, 2020 (Minutes # 12)

Certified by the

Higher Attestation Board
(the State Commission for Academic Degrees and Titles), Ukraine
Edict # 1-05/6 issued on 12.06.2002

Certified by the

Ministry of Justice of Ukraine
State Certificate # 23534-13374 issued on 08.08.18

Founded and published by

Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Kyiv University Publishing
State Certificate # 1103 issued on 31.10.2002

Address

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

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

Іванік О., Тустановська Л., Кравченко Д., Гадяцька К. Адаптація методики структурно-морфометричного аналізу до середовища ГІС для палеогеоморфологічних досліджень Канівського Придніпров'я	6
Дернов В., Удовиченко М. Місцезнаходження решток мезозойських хребетних на території Луганської області (Україна).....	12

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

Квасниця І., Квасниця В. Прості форми кристалів циркону із кристалічних порід Українського щита та їх морфологічні типи	20
Нікітенко І., Старік О., Куцевол М. Результати петрографічного дослідження знахідки кам'яних ливарних форм доби бронзи	28
Дубина О., Кривдік С., Бельський В., Вишневський О. Акцесорні мінерали рідкісних металів у грорудитах Східного Приазов'я (Україна).....	36
Сплодитель А. Закономірності розподілу важких металів на території військового полігону "Олешківські піски".....	42

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О. Електричні та акустичні параметри нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ	49
Карпенко О., Михайлов В., Карпенко І. Особливості оцінки ресурсів газу нетрадиційних колекторів за даними геофізичних досліджень свердловин	59
Круглов О., Меньшов О., Соловей В., Лебедь В., Андрєєва О. Діагностування генетичних особливостей чорноземних ґрунтів методами магнітометрії	65
Бондар К., Сачко А., Цюпа І. Оцінка антропогенного забруднення поверхневих відкладів міста Чернівці за магнітною сприйнятливістю та вмістом важких металів	71
Багрій С., Кузьменко Е., Дзьоба У. Зв'язок природного імпульсного електромагнітного поля Землі з напруженнями та деформаціями гірських порід на відпрацьованих родовищах солі в Передкарпатті в задачах прогнозування розвитку карсту	79
Олійник О., Антонюк В., Безродна І., Вижва С. Аналіз особливостей покладів газу ущільнених порід-колекторів та літолого-петрофізична оцінка відкладів верхнього та середнього карбону Святогірської площі	89

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Керімлі У. Стадії мінералізації та фактори локалізації Агюртського золото-мідно-молібденового родовища (Малий Кавказ, Азербайджан).....	96
Омельчук О., Сокур О. Процеси глибинної дегазації землі як причина утворення донних карбонатних споруд у шельфових зонах океану	102

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Чомко Д., Чомко Ф., Черкашина Н. Штучні гідрогеологічні вікна як джерела забруднення бучацько-канівського водоносного горизонту на північному сході України	110
--	-----

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Ivanik O., Tustanovska L., Kravchenko D., Hadiatska K. Adaptation of the method of structural-morphometric analysis to the GIS environment for paleogeomorphological studies of the Kaniv Dnieper	6
Dernov V., Udovichenko M. Sites of mesozoic vertebrates on the territory of Lugansk region (Ukraine)	12

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Kvasnytsya I., Kvasnytsya V. Simple forms of zircon crystals from crystalline rocks of the Ukrainian shield and their morphological types	20
Nikitenko I., Starik O., Kutsevol M. Results of a petrographic study of the Bronze Age casting molds finds	28
Dubyna O., Kryvdik S., Belskyy V., Vyshnevskiy O. Accessory minerals of rare metals in the grorudites of Eastern Azov (Ukraine)	36
Spodytel A. Heavy metals distribution trends on "Oleshkivski Pisky" military training site	42

GEOPHYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabatura O. Electrical and acoustic parameters of lower permian carbonate rocks (Western part of the Hlynsko-Solokhivskiy of gas-oil-bearing district of the Dnieper-Donets Basin)	49
Karpenko O., Mikhailov V., Karpenko I. resource assessment features of non-traditional reservoirs by the well-logging data	59
Kruglov O., Menshov O., Solovey V., Lebed' V., Andreeva O. Chernozem soil genetic features diagnosis with magnetic methods	65
Bondar K., Sachko A., Tsiupa I. Assessment of anthropogenic pollution of soils in Chernivtsi (Ukraine) by magnetic susceptibility and heavy metal content	71
Bagriy S., Kuzmenko E., Dzoba U. Correlation of natural pulsed electromagnetic field of the Earth with stresses and deformations, which appeared in exhausted salt fields in the Precarpathians for karst creation forecasting	79
Oliinyk O., Antoniuk V., Bezrodna I., Vyzhva S. Analysis of tight gas reservoirs and lithological-petrophysical assessment of upper and middle Carboniferous strata of Svyatogorska Area	89

MINERAL RESOURCES

Kerimli U. Stages of mineralization and localization factors of the Agyurt gold-copper-molybdenum deposit (Lesser Caucasus, Azerbaijan)	96
Omelchuk O., Sokur O. Processes of deep outgassing of the earth as the cause of bottom carbonate buildup formation in the ocean shelf zones	102

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Chomko D., Chomko F., Cherkashyna N. Artificial hydrogeological windows as a source of Buchak-Kaniv aquifer's pollution in the north-east of Ukraine	110
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Иваник Е., Тустановская Л., Кравченко Д., Гадяцкая К. Адаптация методики структурно-морфометрического анализа к среде ГИС для палеогеоморфологических исследований Каневского Приднепровья	6
Дернов В., Удовиченко М. Местонахождения остатков мезозойских позвоночных на территории Луганской области (Украина)	12

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Квасница И., Квасница В. Простые формы кристаллов циркона из кристаллических пород Украинского щита и их морфологические типы	20
Никитенко И., Старик А., Куцевол М. Результаты петрографического исследования находки каменных литейных форм эпохи бронзы	28
Дубина А., Кривдик С., Бельский В., Вишневский А. Акцессорные минералы редких металлов в грорудитах Восточного Приазовья (Украина)	36
Сплодитель А. Закономерности распределения тяжелых металлов на территории военного полигона "Олешковские пески"	42

ГЕОФИЗИКА

Выжва С., Онищук В., Онищук И., Рева Н., Шабатура А. Электрические и акустические параметры нижнепермских карбонатных пород Глинско-Солоховского газонефтеносного района ДДЗ	49
Карпенко А., Михайлов В., Карпенко И. Особенности оценки ресурсов газа нетрадиционных коллекторов по данным геофизических исследований скважин	59
Круглов А., Меньшов А., Соловей В., Лебедь В., Андреева Е. Диагностирование генетических особенностей черноземных почв методами магнитометрии	65
Бондар К., Сачко А., Цюпа И. Оценка антропогенного загрязнения поверхностных отложений города Черновцы по магнитной восприимчивости и содержанию тяжелых металлов	71
Багрий С., Кузьменко Э., Дзьоба У. Связь естественного импульсного электромагнитного поля Земли с напряжениями и деформациями горных пород на отработанных месторождениях соли в Прикарпатье в задачах прогнозирования развития карста	79
Олейник О., Антонюк В., Безродная И., Выжва С. Анализ особенностей залежей газа уплотненных пород-коллекторов и литолого-петрофизическая оценка отложений верхнего и среднего карбона Святогорской площади	89

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Керимли У. Стадии минерализации и факторы локализации Агюртского золото-медно-молибденового месторождения (Малый Кавказ, Азербайджан)	96
Омельчук А., Сокур О. Процессы глубинной дегазации земли как причина образования донных карбонатных построек в шельфовых зонах океана	102

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Чомко Д., Чомко Ф., Черкашина Н. Искусственные гидрогеологические окна как источники загрязнения бучакско-каневского водоносного горизонта на северо-востоке Украины	110
---	-----

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 502.58

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.01>

О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
Л. Тустановська, канд. геол. наук,
E-mail: ljume4@ukr.net;
Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: dm.vl.kravchenko@gmail.com;
К. Гадяцька, інж.,
E-mail: katkravchuk@gmail.com;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

**АДАПТАЦІЯ МЕТОДИКИ СТРУКТУРНО-МОРФОМЕТРИЧНОГО АНАЛІЗУ
ДО СЕРЕДОВИЩА ГІС ДЛЯ ПАЛЕОГЕОМОРФОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
КАНІВСЬКОГО ПРИДНІПРОВ'Я**

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

Канівське Придніпров'я є унікальним регіоном, що зазнав складної еволюції впродовж неоген-четвертинного етапу. Застосування геологічних та геоморфологічних методів, даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій надало можливість виявити генетичний зв'язок між процесами геоморфогенезу та тектогенезу в межах Канівського Придніпров'я та побудувати низку геологічних та геоморфологічних моделей. Адаптовано методику структурно-морфометричного аналізу до середовища ГІС та автоматизовано процес картометричних побудов. Розроблено алгоритм створення карт порядків долин та базисних поверхонь, що являють собою складні поверхні, які об'єднують місцеві базиси ерозії та виражають сумарні рухи земної кори за різні проміжки часу. Дослідження морфогенезу та тектогенезу території Канівського Придніпров'я показали, що неотектонічні рухи у межах цього регіону мали диференційований характер. Встановлено п'ять стадій тектонічної еволюції впродовж неоген-четвертинного етапу його розвитку. Досліджено гіпсометрію базисних поверхонь п'яти порядків, проведено детальне зіставлення морфології однопорядкових поверхонь. На основі отриманих даних щодо характеру поверхонь, абсолютних та відносних відміток, характеру малюнку ізобазит детально проаналізовано геоморфологічну будову регіону, характерну для кожної стадії. Проведені дослідження дали змогу виявити закономірний зв'язок рельєфу з тектонікою, виявити різноманітні тектонічні структури та визначити особливості їхньої будови.

Ключові слова: ГІС аналіз, структурно-морфометричний метод, моделювання, цифрові моделі, дислокації, палеорельєф.

Вступ та постановка проблеми. Тектонічний розвиток різноструктурних регіонів України у новітній час відрізняється особливою складністю, що певною мірою відбивається у рельєфі. У зв'язку з цим на сьогодні існує значна кількість підходів, гіпотез та теорій щодо їх геологічної еволюції, що базуються на різноманітних методах аналітичних та експериментальних досліджень. Одним із регіонів, що характеризується складним поєднанням процесів тектогенезу та морфогенезу впродовж неоген-четвертинного етапу розвитку, є Канівське Придніпров'я, появлення еволюції якого ґрунтується на різноманітних теоріях та гіпотезах із залученням геоморфологічних та геологічних методів (Menshov et al., 2018). Район Канівського Придніпров'я вирізняється складною дислокованою мезо-кайнозойського осадкового комплексу з розвитком складчастих та лускувато-насувних структур, ускладнених різнопорядковими ін'єктивними формами. Попри тривалу історію геологічних досліджень, походження Канівських дислокацій, розміщених на північно-східному схилі Українського щита (УЩ) поблизу Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), залишається одним із найдискусійніших питань геології України. Локальний прояв таких дислокацій новітнього часу, їхня просторова організація та інтенсивність деформаційних процесів вимагають розробки особливих підходів до їх вивчення, створення геолого-геоморфологічних моделей та встановлення механізмів новітнього тектогенезу і геоморфогенезу.

Завдяки "чутливості" рельєфу щодо послідовності геологічних процесів і стадійності новітнього тектогенезу особливе місце у такому аналізі мають геоморфологічні методи, зокрема метод структурної морфометрії. Цей метод є інструментом виявлення генетичного зв'язку між геоморфологічними та тектонічними процесами, між формами земної поверхні та структурами земної кори. Завданням структурно-морфометричного аналізу є створення математичних моделей земної поверхні з їх подальшою інтерпретацією. За результатами структурно-

морфометричних досліджень виконується реконструкція тектонічного розвитку території через розвиток рельєфу в новітній час, розрахунки амплітуди тектонічних рухів, встановлення етапів тектонічної активізації та аналізу потенційного розвитку небезпечних геологічних процесів.

Метод структурної морфометрії базується на графічному розкладанні рельєфу на базисні, залишкові, вершинні й ерозійні поверхні відповідно до порядків долин і вододільних ліній. Метод передбачає виконання низки картографічних операцій, що ускладнює його використання у регіонах із складним, різко розчленованим рельєфом. Однак використання спеціалізованого програмного забезпечення із функціональними можливостями просторового аналізу значно полегшує процес морфометричних побудов. Відомими геоінформаційними системами, що дозволяють проводити різноманітні операції за векторизації, математичного та просторового моделювання, а також створення різноманітних тематичних карт, є програмні пакети ArcGIS, ArcView GIS, ArcInfo (ESRI Inc.), Easy Trace (EasyTrace Group), MapInfo (MapInfo Corp.), GeoMedia (Intergraph Corp.), MicroDEM / Terra Base (U.S. Naval Academy) та ін. Геоінформаційні системи є дієвим інструментом у різнобічному дослідженні рельєфу, насамперед, для кількісної та якісної інтерпретації різногенетичних побудов, а також для виділення й розпізнавання об'єктів за набором даних. Програмні продукти компанії ESRI (ArcGIS, ArcView GIS, ArcInfo) є найефективнішими ГІС для виконання структурно-морфометричного аналізу. Для аналізу палеорельєфу та визначення його морфогенетичних особливостей використано програмне забезпечення ArcGIS 10.6 (ESRI) та його спеціалізовані модулі з потужними функціональними можливостями загального просторового аналізу, картометричних побудов, перетворення і аналізу ізолінійних та ґрид-поверхонь, а також просторово-часового моделювання.

Структурно-морфометричний аналіз території Канівського Придніпров'я та автоматизація картометричних побудов. Побудова моделей рельєфу Канівського Придніпров'я за методом структурної морфометрії вимагає створення реляційної бази геоданих, яка б містила об'єднану картографічну та атрибутивну інформацію щодо різнопорядкових долин та різногенетичних поверхонь рельєфу. Для побудови цієї геобазисних даних, що об'єднує набори класів об'єктів, автономні об'єктні класи, класи просторових об'єктів, класи відношень та атрибутивні домени, використовувались загальні принципи таких побудов (Бурштинська, 2003).

У ході досліджень було використано дані дистанційного зондування Землі (зокрема, цифровий знімок супутника Landsat 8), які дали можливість отримати відомості про район досліджень у вигляді зображень у цифровому діапазоні. Для обробки супутникових зображень використано спеціалізовані модулі ГІС. Оптико-електронні системи дистанційного зондування землі надвисокої розрізненості дали найбільш якісне кольо-

рове зображення, а інфрачервона зйомка надала можливість спостерігати аномальні ділянки на поверхні Землі (Menshov, 2018).

Першим етапом структурно-морфометричного аналізу є створення карт порядків долин і вододільних ліній. Встановлено, що зазвичай долини успадковують активні розломні порушення, напрямки яких збігається з векторами градієнтів геопотенціалів. Для аналізу долин, а саме їх поділу на порядки, В.П. Філософовим було запропоновано дихотомічну класифікацію, в основі якої є збільшення порядку долини при злитті однопорядкових одиниць.

Для побудови карти порядків долин Канівського Придніпров'я було використано розроблений алгоритм із використанням функціональних модулів Spatial Analyst та інструментів Tool "Hydrology". Послідовність картометричних перетворень полягає у побудові та згладжуванні поверхні, визначенні напрямку долин та напрямку стоку, перетворенні растрової поверхні у векторну та ін. (послідовність операцій: "Fill", "Flow Direction", "Flow Accumulation", "Stream Order") (рис. 1).

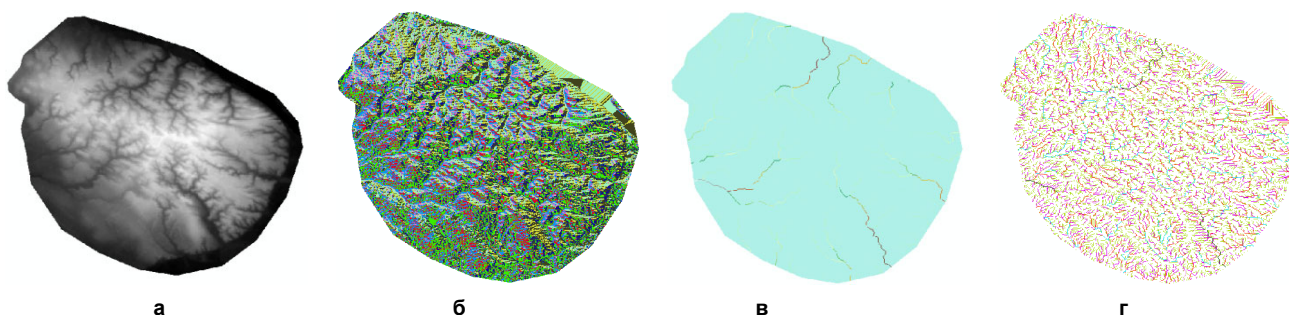


Рис. 1. Алгоритм створення карт порядків долин:

а – вирівнювання поверхні "Fill"; б – визначення напрямку долин "Flow Direction"; в – визначення напрямку стоку "Flow Accumulation"; г – розподіл долин за порядками "Stream Order"

При цьому кожний порядок долин диференційовано за віком та кольором (рис. 2).

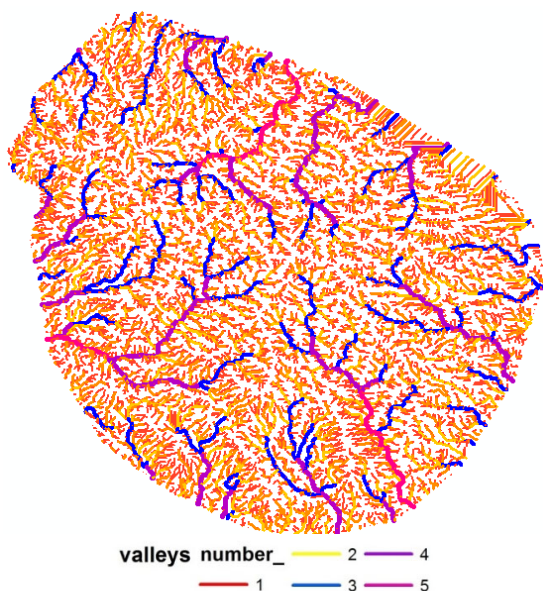


Рис. 2. Фрагмент карти порядків долин Канівського Придніпров'я

Розроблений модуль дав можливість закартувати всі ерозійні форми дослідженого регіону. Виділено шість порядків долин. Гідрографічна сітка має радіальний рисунок, оконтурюючи Канівський горст як геоструктуру (Філосо-

фов, 1961). Отримана таким способом карта порядків долин дозволяє автоматизувати побудову карт базисних поверхонь та здійснити їх подальшу інтерпретацію.

Для аналізу неотектогенезу та морфогенезу Канівського Придніпров'я побудовано карти базисних поверхонь, що являють собою складні поверхні, які об'єднують місцеві базиси ерозії. Базисні поверхні виражають сумарні рухи земної кори за різні проміжки часу. У побудові карт базисних поверхонь, основою якої є карта порядків долин та цифровий рельєф місцевості, велику роль відіграє використання атрибутивних запитів та аналіз просторових даних. У результаті досліджень проведено вибірку за атрибутивними даними кожного окремого порядку та створено окремі класи об'єктів за просторовими даними. Необхідність вибору полягає у відокремленні одних порядків від інших та збереженні їх атрибутивних даних. Також є можливим варіант вибірки порядків долин через властивості шару та функцію Symbols, при цьому вибірка даних не візуалізується, однак використовується для подальших побудов (Іванік та Тустановська, 2011).

На основі використання супутникових зображень було побудовано карту ізоліній рельєфу з інтервалом горизонталей 5 м (рис. 3), що має значення для точності подальших побудов, оскільки для традиційних побудов використовуються переважно топографічні карти масштабу 1 : 25 000.

Для визначення точок перетину горизонталей із відповідними порядками долин використано інструменти Analysis Tools – Overlay – Intersect. За отриманими даними точкових об'єктів створено растрові та векторні моделі палеорельєфу залежно від порядків, що дають можливість візуалізувати морфологію палеорельєфу району (рис. 4).

Для більш повного аналізу базисних і вершинних поверхонь використовують TIN-моделі (Triangulated Irregular Network), що будуються за допомогою модуля Spatial Analyst (ArcMap, ArcView GIS) на основі ізолінійних поверхонь. Карти базисних поверхонь та карти вершинних поверхонь є статичними, вони дають можливість проаналізувати зв'язок між морфометричними поверхнями та тектонічними структурами. Тому для аналізу та

інтерпретації даних, отриманих традиційним та автоматизованим методом, та відповідної побудови базисних поверхонь рельєфу, використано TIN-моделі, які є багатограничними поверхнями – нерегулярною сіткою трикутників, вершинами яких є вихідні опорні точки, а також точки – метрики структурних ліній і площ заповнення постійним значенням.

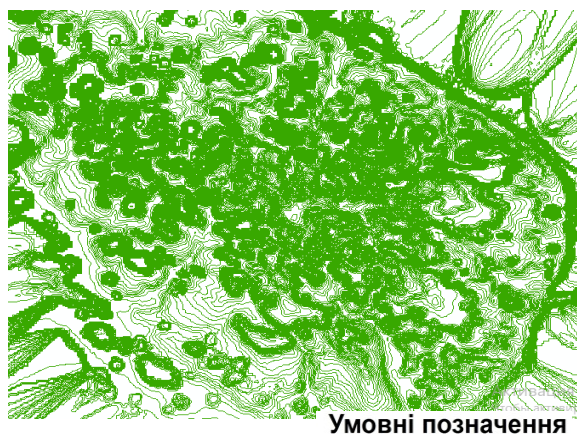


Рис. 3. Ізолінійна модель сучасного рельєфу (інтервал горизонталей 5 м)

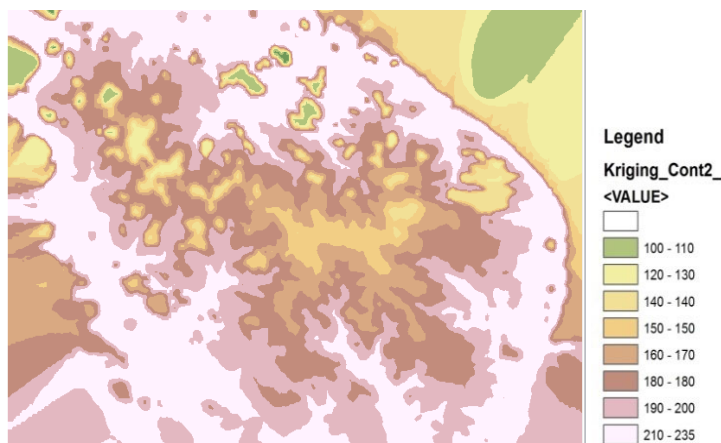


Рис. 4. Побудова базисної моделі 2-го порядку із застосуванням методу інтерполяції Kriging

На основі застосування спеціалізованого модуля Spatial Analyst векторні теми ізообазит перетворено у растровий формат та застосовано доступні аналітичні можливості ґрид-аналізу: створення поверхонь, буферизація просторових об'єктів та ін. Проведено інтерполяцію даних із використанням різних методів інтерполяції – зворотного зважених відстаней та сплайну (створення поверхонь із мінімальною кривизною). Програмні можливості спеціалізованих модулів дозволяють порівнювати різницю висот між вершинами кожної грані TIN з відповідними горизонтальними відстанями (Тустановская, 2014).

Наступні аналітичні операції з виконання ґрид-аналізу передбачали використання функціональних можливостей спеціалізованих модулів 3D Analyst та Spatial Analyst. Так,

зокрема, виконано статистичний аналіз побудованих морфометричних поверхонь з отриманням даних щодо максимальних та мінімальних висот, їх розподілу та стандартного відхилення (Шевчук та ін., 2012).

Оскільки долини 1-го порядку – це елементи сучасних ерозійних систем, то цифрова модель рельєфу, побудована за аналізом космічного знімку, відповідає карті базисної поверхні 1-го порядку. Для побудови карти базисної поверхні 2-го порядку використано точки перетину ізоліній (горизонталей) із долинами 2-го порядку, без врахування долин інших порядків (рис. 5, б). Аналогічно побудовано карти базисних поверхонь 3-го – 5-го порядків (Хромих та Хромих, 2007).

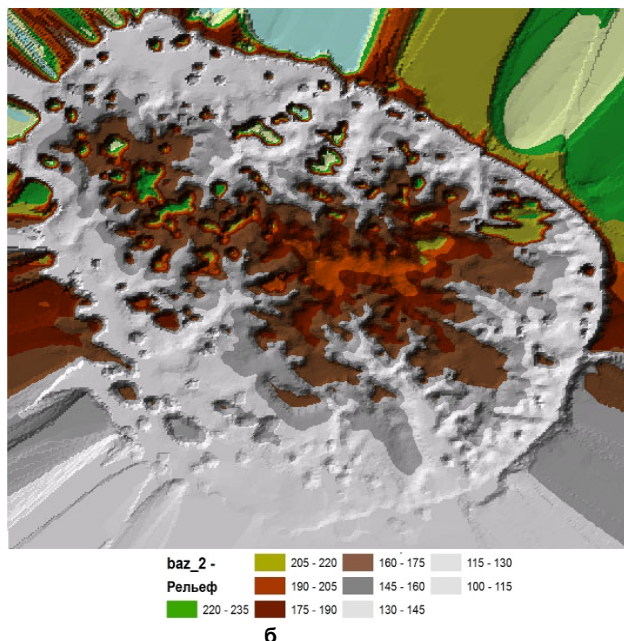
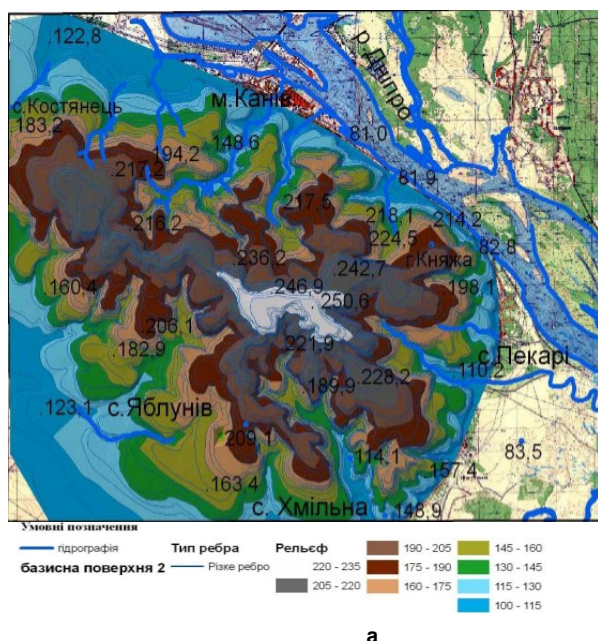


Рис. 5. Карти базисної поверхні 2-го порядку Канівського Придніпров'я, створені традиційним (а) та автоматизованим способом (б)

У результаті порівняння моделей базисних поверхонь, побудованих традиційним та автоматизованим способом, визначено переваги та недоліки використання обох методів. Так, на картах базисної поверхні 2-го порядку фіксується подібна морфологічна будова поверхні (рис. 5). Найвищі ділянки у межах карт збігаються за площею та формою. На карті, отриманій автоматизованим способом, виділяються більше локальних структур, ніж на карті, побудованій традиційним шляхом. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при автоматичній побудові не враховуються такі елементи рельєфу, як перехвати русел річок, які на території району розташовані дуже близько. Особливо це стосується периферійних ділянок, де яружна сітка сильно розгалужена та характеризується різким перепадом висот. Для усунення цих неточностей необхідно застосувати функцію згладжування рельєфу.

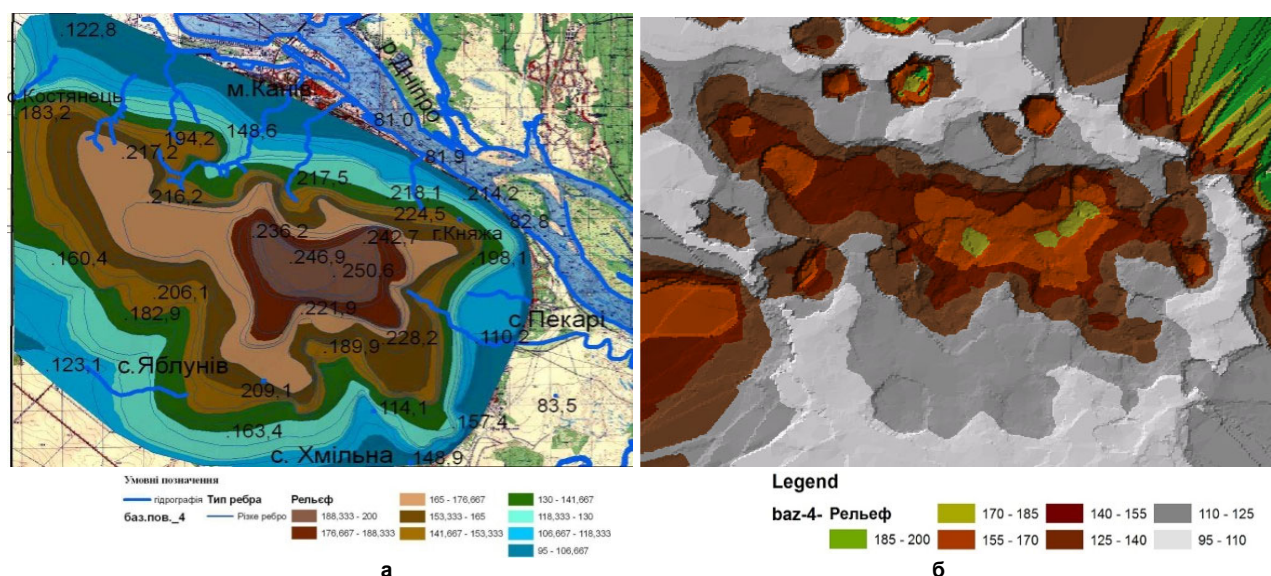
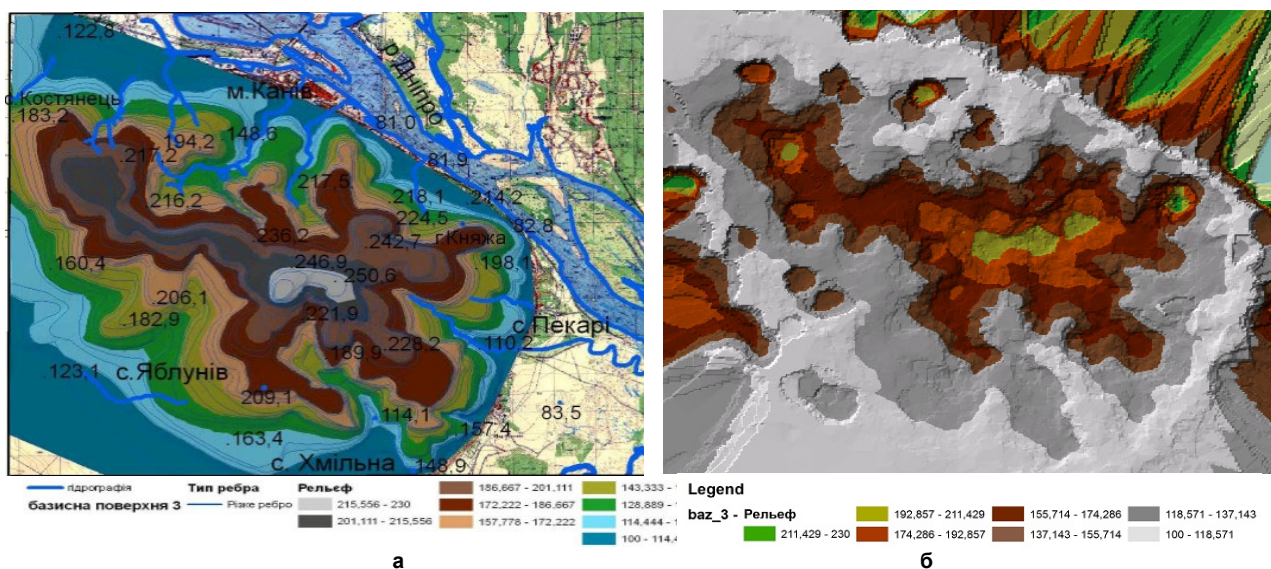
У результаті аналізу побудованих двома способами карт базисних поверхонь 3-го та 4-го порядку підтверджено подібну морфологічну будову палеорельєфу в межах цих моделей (рис. 6, 7).

На карті базисної поверхні 4-го порядку, створеній автоматизованим способом, виділяються деякі локальні

ділянки із максимальними показниками висот. Тобто алгоритм коду враховує та виділяє такі елементи рельєфу, як сідловини, що розмежують форми рельєфу на ділянки, утворюючи окремі структури.

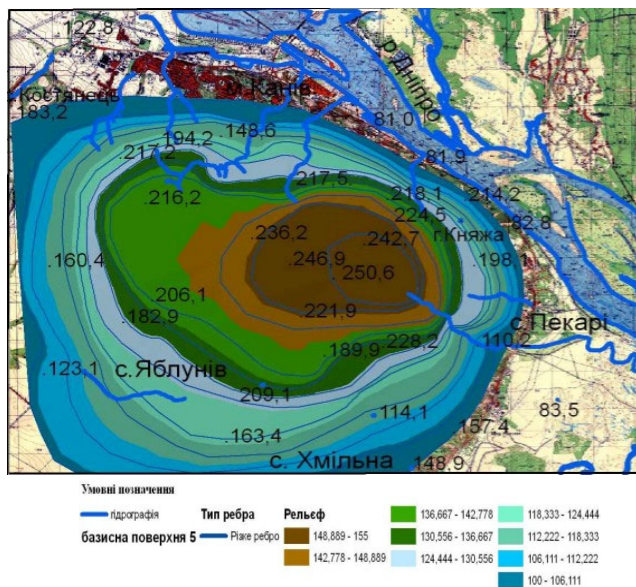
Порівняльна характеристика карт базисної поверхні 5-го порядку за обома методами показала, що максимальні та мінімальні показники висот на обох картах збігаються, але спостерігаються значні відмінності за абрисом, особливо це стосується периферійних ділянок, де зображення дещо розмиті та неточні (рис. 8). Це підтверджує необхідність залучення для картографічних побудов більших за площею ділянок при побудові базисних поверхонь вищих порядків.

Таким чином, автоматизований метод побудови карт порядків долин та базисних поверхонь надає можливість створення моделей палеорельєфу, однак не завжди враховує існування таких локальних форм рельєфу, як перехвати річкових русел та сідловини. На растрових моделях створюються поверхні гострокутних ізобазит, які змінюють форми та вигляд структур. Для виправлення цих неузгоджень та спотворень необхідно підключати додаткові інструменти та модулі.

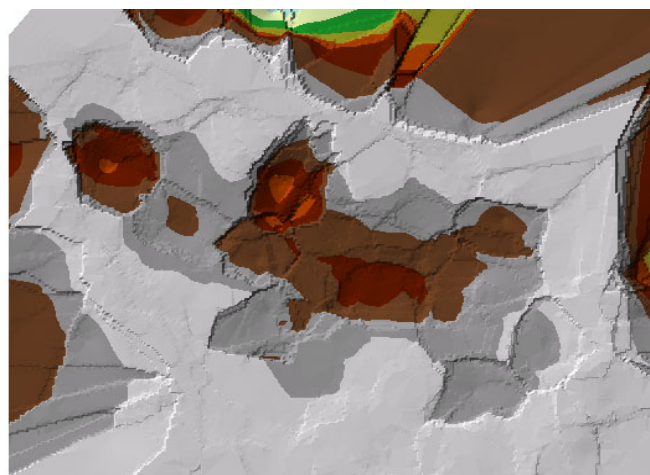


У цілому аналіз базисних поверхонь Канівського Придніпров'я дозволив постадійно простежити розвиток рельєфу цієї території впродовж неотектонічного етапу. Встановлено п'ять стадій морфогенезу Канівського Придніпров'я, що характеризують їх тектонічну еволюцію. Досліджено гіпсометрію базисних поверхонь п'яти порядків, проведено детальне зіставлення однопорядкових поверхонь, визначено морфологію рельєфу. На основі отриманих даних щодо характеру поверхонь,

абсолютних та відносних відміток, характеру малюнку ізобазит детально проаналізовано геоморфологічну будову регіону, характерну для кожної стадії. Зіставлення та уточнення отриманих результатів із даними польових геолого-геоморфологічних спостережень, геолого-структурними та літолого-стратиграфічними даними дозволило встановити геологічну еволюцію цього регіону впродовж неотектонічного та сучасного етапів.



а



б

Рис. 8. Карти базисної поверхні 5-го порядку Канівського Придніпров'я, створені традиційним (а) та автоматизованим способом (б)

Висновки. Комплексне застосування геологічних та геоморфологічних методів (структурно-морфометричного аналізу, методу порівняльної тектоніки та структурного аналізу), даних дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій надало можливість виявити генетичний зв'язок між процесами геоморфогенезу та тектогенезу в межах Канівського Придніпров'я, визначити фактори формування та активізації небезпечних геологічних процесів, а також побудувати низку геологічних та геоморфологічних моделей. Адаптовано методіку структурно-морфометричного аналізу до середовища ГІС та автоматизовано процес картометричних побудов. Розроблено алгоритм створення карт порядків долин та базисних поверхонь, що являють собою складні поверхні, які об'єднують місцеві базиси ерозії та виражають сумарні рухи земної кори за різні проміжки часу. Для уточнення тектонічної схеми регіону, виявлення локальних та похованих структур, разом з різногенетичними морфометричними побудовами, застосовано геоморфологічні, геолого-геофізичні та геодезичні дані, що, у свою чергу, підвищило інформативність структурно-морфометричного аналізу, а також збільшило точність та достовірність інтерпретації морфометричних побудов.

Список використаних джерел

- Бурштінська, Х.В. (2003). Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картометричними даними. Л.: Національний ун-т "Львівська політехніка".
- Іванік, О.М., Тустановська, Л.В. (2011). Застосування класичних методик структурно-морфометричного аналізу для реконструкції новітнього тектогенезу на основі ГІС. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 53, 4-7.
- Костин, А.В. (2011). Цифровая модель рельефа. Методы создания и направления использования. Т. 1.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 8(01), 40-45.

- Тустановская, Л.В. (2014). Исследования зон новейших движений Среднего Приднепровья инструментами ГИС. *Международный научно-технический и производственный электронный журнал "Наука о Земле"*, 3, 18-27.
- Философов, В.П. (1961). Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур.
- Хромих, В.В., Хромих, В.О. (2007). Цифрові моделі рельєфу. ТМЛ-Пресс.
- Шевчук, В.В., Іваннік, Е.М., Тустановська, Л.В., Андриец, Т.В. (2012). Структурно-морфометрический анализ горного рельефа на основе ГИС (на примере Каневского Приднепровья). *Материалы X Международной научной конференции "Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты"*, Киев.
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(4), 681-696.

References

- Burshynska, H.V. (2003). Theoretical and methodological foundations of digital terrain modeling based on photogrammetric and cartometric data. Lviv: Lviv Polytechnic National University. [in Ukrainian]
- Filosofov, V.P. (1961). A brief guide to the morphometric method of searching for tectonic structures. [in Russian]
- Hromih, V.V., Hromih, V.O. (2007). Digital terrain models. TML-Press. [in Ukrainian]
- Ivanik, O.M., Tustanovska, L.V. (2011). Application of classical methods of structural and morphometric analysis for reconstruction of modern GIS-based tectogenesis. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 53, 4-7. [in Ukrainian]
- Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 8(01), 40-45. [in Ukrainian]
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 62(4), 681-696.
- Shevchuk, V.V., Ivanik, O.M., Tustanovska, L.V., Ivankevych, G.E. (2012). Structural-morphometric analysis of mountain relief based on GIS (on the example of the Kanev Dnieper). *Abstract of X International Scientific Conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, Kyiv. [in Ukrainian]
- Tustanovska, L.V. (2014). Investigation of the zones of the most recent movements of the Middle Dnieper region by GIS instruments. *International scientific-technical and production electronic journal "Earth Science"*, Moscow, 3, 18-27. [in Russian]

Надійшла до редколегії 27.11.19

O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
L. Tustanovska, PhD (Geol.)
E-mail: ljume4@ukr.net;
D. Kravchenko, PhD (Geol.)
E-mail: dm.vl.kravchenko@gmail.com;
K. Hadiatska, Engineer
E-mail: katkravchuk@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ADAPTATION OF THE METHOD OF STRUCTURAL-MORPHOMETRIC ANALYSIS TO THE GIS ENVIRONMENT FOR PALEOGEOMORPHOLOGICAL STUDIES OF THE KANIV DNIEPER

Kaniv Dnieper area is a unique region that has evolved through the Neogene-Quaternary phase. The application of geological and geomorphological methods, remote sensing data and GIS made it possible to identify the genetic relationship between the processes of geomorphogenesis and tectogenesis within the Kaniv Dnieper region, to build a number of geological and geomorphological models. The methodology of structural-morphometric analysis is adapted to the GIS and the process of cartometric constructions is automated. An algorithm for creating order maps of valleys and basal surfaces has been developed. Basal surfaces are complex surfaces that combine local erosion bases and express the total movements of the earth's crust over various time intervals. A study of the morphogenesis and tectogenesis of the territory of the Kaniv Dnieper region showed that the neotectonic movements within this region had a differentiated character. Five stages of tectonic evolution were determined during the Neogene-Quaternary stage of its development. Hypsometry of basic surfaces of five orders was investigated, and a detailed comparison of the morphology of single-order surfaces has been made. On the basis of the obtained data on the nature of the surfaces, absolute and relative elevations, the nature of the isobasite pattern, the geomorphological structure of each stage has been analyzed in detail. The conducted studies revealed a regular relationship between the relief and tectonics.

Keywords: GIS analysis, structural-morphometric method, modeling, digital models, dislocations, paleorelief.

Е. Иваник, д-р геол. наук, проф.
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
Л. Тустановская, канд. геол. наук
E-mail: ljume4@ukr.net;
Д. Кравченко, канд. геол. наук, доц.
E-mail: dm.vl.kravchenko@gmail.com;
К. Гадяцкая, инж.
E-mail: katkravchuk@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, Киев, 03022, Украина

АДАПТАЦИЯ МЕТОДИКИ СТРУКТУРНО-МОРФОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА К СРЕДЕ ГИС ДЛЯ ПАЛЕОГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАНЕВСКОГО ПРИДНЕПРОВЬЯ

Каневское Приднєпровье является уникальным регионом, характеризующимся сложной эволюцией на протяжении неоген-четвертичного этапа. Применение геологических и геоморфологических методов, данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий позволило выявить генетическую связь между процессами геоморфогенеза и тектогенеза в пределах Каневского Приднєпровья, а также построить ряд геологических и геоморфологических моделей. Адаптирована методика структурно-морфометрического анализа к среде ГИС и автоматизирован процесс картометрических построений. Разработан алгоритм создания карт порядков долин и базисных поверхностей, представляющих собой сложные поверхности, которые объединяют местные базисы эрозии и выражают суммарные движения земной коры за различные промежутки времени. Исследование морфогенеза и тектогенеза территории Каневского Приднєпровья показали, что неотектонические движения в пределах этого региона имели дифференцированный характер. Выделены пять стадий тектонической эволюции на протяжении неоген-четвертичного этапа его развития. Исследована гипсометрия базисных поверхностей пяти порядков, проведено детальное сопоставление морфологии однопорядковых поверхностей. На основе полученных данных о характере поверхностей, абсолютных и относительных отметок, характере рисунка изобазит детально проанализировано геоморфологическое строение региона, характерное для каждой стадии. Проведенные исследования позволили выявить закономерную связь рельефа и тектоники, выявить разноранговые тектонические структуры и проанализировать особенности их строения.

Ключевые слова: ГИС анализ, структурно-морфометрический метод, моделирование, цифровые модели, дислокации, палеорельеф.

УДК 551.763.31+568.1(477.46+477.43+477.44)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.02>

В. Дернов, асп.,
E-mail: vitalydernov@gmail.com,
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна;
М. Удовиченко, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: triakis26@gmail.com,
Луганський національний університет імені Тараса Шевченка,
пл. Гоголя, 1, м. Старобільськ, 91011, Україна

МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ РЕШТОК МЕЗОЗОЙСЬКИХ ХРЕБЕТНИХ НА ТЕРИТОРІЇ ЛУГАНСЬКОЇ ОБЛАСТІ (УКРАЇНА)

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

Мета роботи полягає у визначенні стану вивченості та перспектив подальших досліджень решток хребетних тварин із мезозойських відкладів Луганської області. Для досягнення поставленої мети було проведено збір та узагальнення інформації щодо місцезнаходжень решток хребетних тварин серед мезозойських відкладів Луганщини. Незважаючи на значну кількість знахідок решток різноманітних груп мезозойських хребетних тварин на суміжних із Донбасом територіях, їх систематичним та цілеспрямованим вивченням на Луганщині, на жаль, ніхто не займався, хоча повідомлення про знахідки залишків мезозойських хребетних на території області зустрічаються досить часто.

У результаті обробки опублікованих матеріалів та попередньої інтерпретації польових спостережень складено перелік з 20 місцезнаходжень, розташованих переважно на правобережжі Сіверського Дінця у межах Луганської області. Майже всі місцезнаходження приурочені до верхньокрейдових відкладів, невелика кількість – до базального шару палеогену і лише одне – до тріасових утворень.

Переважає більшість місцезнаходжень верхньокрейдового віку розташована у межах зони, що контактує з масивом кам'яновугільних відкладів (так званого відкритого карбону). З віддаленням від нього породи стають все більш відкрито-морськими і в них різко знижується різноманітність викопної фауни. Тому, окреслюючи коло перспективних на знаходження решток хребетних тварин районів, слід пам'ятати про вказану вище закономірність їх розміщення.

Ключові слова: хребетні тварини, Луганська область, мезозой, місцезнаходження.

Постановка проблеми. Незважаючи на значну кількість знахідок решток різноманітних груп мезозойських хребетних тварин на суміжних із Донбасом територіях (перш за все, це Курська та Білгородська області РФ, Поволжя та ін.), їх систематичним та цілеспрямованим вивченням на Луганщині, на жаль, ніхто не займався. Тим не менш, згадки про знахідки решток різних риб та рептилій серед відкладів верхньої крейди Луганської області трапляються у публікаціях багатьох геологів, палеонтологів та краєзнавців (Луппов, 1949; Бланк та Липник, 1962; Глиман і др., 1987; Мефферт, 1924 та ін.).

Перспективність вказаної території для вивчення фауни хребетних мезозою є безсумнівною, зважаючи на близькі літо-фаціальні та тафономічні особливості верхньокрейдових відкладів Північного Донбасу і, наприклад, Поволжя, звідки відомі численні рештки риб, черепах, мозазаврид, завро- та іхтіоптеригій, птерозаврів і динозаврів (Ископаемые позвоночные..., 2008, 2012, 2015). Саме низький стан вивченості хребетних тварин спонукав нас провести роботу з узагальнення відомостей щодо знахідок їх решток серед мезозойських відкладів Луганської області задля можливості постановки широких пошуків кістконосних відкладів у майбутньому. Раніше робота з інвентаризації місцезнаходжень палеогенових хребетних тварин Луганщини була проведена М.І. Удовиченком (Удовиченко, 2008). Таким чином, дані публікації можуть стати опорою для планування систематичного дослідження місцезнаходжень решток мезокайнозойських хребетних північної окраїни Донбасу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На жаль, всі роботи, присвячені вивченню та ревізії місцезнаходжень хребетних мезозойського віку Росії і сусідніх держав, мають оглядовий характер (Ивахненко и Курочкин, 2008; Курочкин и Лопатин, 2012; Курочкин и др., 2015; Несов, 1995, 1997; Рождественский, 1973; Storrs et al., 2000) і не надають вичерпну інформацію щодо розглянутої проблеми.

Ступінь вивченості решток хребетних мезозою Луганщини, як вже відзначалося, є досить низьким. Майже вся література, що стосується верхньокрейдової фауни

хребетних Луганщини, вміщена в одному довіднику (Ковальчук, 2013).

О.В. Савчинська (1982), яка багато років присвятила вивченню верхньокрейдових відкладів Донбасу, відзначала, що рештки хребетних серед даних відкладів представлені зубами акул і кісткових риб, а також фрагментами скелетів останніх, зубними пластинками скатів та химер, хребцями риб та морських рептилій, фрагментами кісток і копролітами. Нею відзначено, що найбільш багатим інтервалом розрізу є сеноман, далі за кількістю знахідок йде верхній кампан. Значно менше знахідок решток хребетних виявлено у верхньому туроні та маастрихті. У нижньому туроні, коньяці, сантоні та нижньому кампані рештки хребетних тварин автором не знайдені. На жаль, багато місцезнаходжень, що були відкриті О.В. Савчинською, наразі є втраченими.

Матеріал та методика. При підготовці даної статті авторами було проаналізовано літературні джерела та вивчено фонди музеїв (Сватівський краєзнавчий музей, Геологічний музей Луганського національного університету імені Тараса Шевченка, Національний науково-природничий музей НАН України), а також проведено інтерпретацію власних польових та камеральних досліджень.

Наведений нижче перелік місцезнаходжень не претендує на повноту, оскільки багато матеріалів, без сумніву, не було взято до уваги, бо вони зберігаються в особистих колекціях, у зібраннях невеликих музеїв (наприклад, шкільних) та ін. Деякі вивчені нами фосилії не мають географічної та стратиграфічної прив'язки і тому не можуть бути використані в наукових дослідженнях. Але в наведений нижче перелік нами включено інформацію про дві скам'янілості (місцезнаходження № 1 та 8), географічне походження яких точно не відоме. Вони, проте, мають велике значення для обґрунтування перспектив пошуку скам'янілих решток хребетних на Луганщині. Інформація щодо невідомих раніше місцезнаходжень решток хребетних, відкритих в останні роки авторами, має попередній характер (зібрані кам'яні матеріали потребують подальшого вивчення). Всі описані місцезнаходження нанесено на карту (рис. 1).

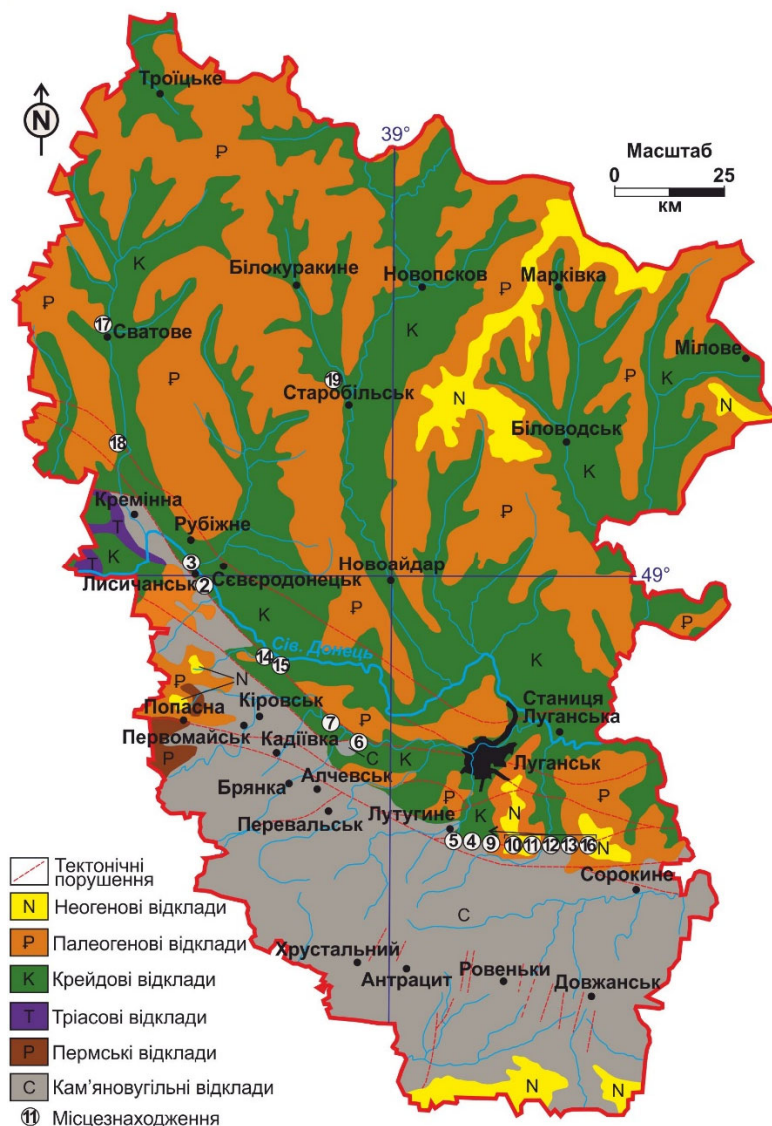


Рис. 1. Географічне положення місцезнаходжень решток хребетних триасу та крейди на території Луганської області

Стратиграфія та поширення мезозойських відкладів Луганщини. Мезозойські відклади на території Луганської області представлені всіма трьома системами, проте лише утворення триасу та крейди виходять на денну поверхню.

Триасові відклади відслонюються в західній частині Луганської області – у районі міст Кремінна та Лисичанськ, хоча під чохлам більш молодих відкладів вони мають дещо ширше географічне поширення. Відклади триасу Луганщини віднесено до однієї світи – сребрянської, яка представлена зеленувато-сірими слабкоступчастими пісковиками з прошарками алевролітів та аргілітів і строкатими жирними щільними глинами з прошарками глинистих світло-сірих вапняків (Резніков, 2003). Потужність світи – 10–112 м. На території Луганської області розріз сребрянської світи палеонтологічно не охарактеризовано, хоча в інших районах площі її поширення відомі рештки харових водоростей та остракод (Іванников і Пермяков, 1967). Відклади вказаної світи є осадами алювіальних рівнин, причому нижня частина світи складена піщано-глинистими та карбонатними утвореннями алювіального та озерно-болотного походження, верхня – річковими пісковиками та озерними глинами.

Відклади юрської системи на Луганщині на денну поверхню не виходять, хоча за даними буріння поширені у

західній частині області, де залягають з розмивом на утвореннях карбону та триасу. Нижню частину розрізу юри складає кожулинська світа (пізній плинсбах-ранній аален (Гожик, 2013), що представлена товщею темно-сірих глин із проверстками пісковиків та пісків і лінзочками кам'яного вугілля. Потужність світи – 9–75 м (Резніков, 2003). Вище залягає товща сірих глин із прошарками піщаного, алевритового і глинистого матеріалу та з шамотизованим вапняком у підшві. Цю товщу, виділену в черкаську світу потужністю 5–36 м, датовано раннім-пізнім байосом (Гожик, 2013; Резніков, 2003). Вище залягають сірі та зеленувато-блакитно-сірі глини з прошарками пісковиків та алевролітів, що виділені у підлужну світу, потужністю 5–19 м (Резніков, 2003). Вік даного стратону – пізній байос-ранній бат (Гожик, 2013). Ще вище спостерігаються середньо-верхньобатські (Гожик, 2013) утворення згідно кам'яньської світи, представленої коричнево-сірими глинами з прошарками вапняків (знизу) та сірими пісковиками (вгорі). Потужність світи сягає 34 м (Резніков, 2003). Юрські відклади, що поширені у межах Луганської області, охарактеризовано лише спорово-пилковими комплексами (Резніков, 2003).

Відклади верхньої крейди поширені північніше лінії, що з'єднує населені пункти Сорокине–Лутугине–Алчевськ–Лисичанськ–Кремінна. Розріз верхньої крейди Донбасу починається відкладами слов'яногірської світи

(сеноман–ранній турон), що представлена галечниками та конгломератами, пісками, пісковиками, мергелями і детритовими вапняками. Потужність – до 35–40 м. Вище залягає райгородська серія (турон, коньяк та сантон), яка складається з двох світ – широківської та еланчицької, розріз (потужність до 300 м) яких складений крейдою та мергелями. Кампанський вік мають криволуцька (товща мергелів потужністю до 80 м; ранній кампан) та сидорівська світи (товща крейди, мергелів, вапняків та пісків потужністю до 300 м; середній–пізній кампан). Маастрихтські відклади представлені коноплянівською (товща мергелів та крейди потужністю до 100 м; ранній маастрихт) та кам'янобрідською світою (розріз, потужністю 30–100 м, складений крейдою, мергелями та пісками; ранній маастрихт) (Гожик, 2013).

Викладення основного матеріалу. Нижче наводимо у стратиграфічній послідовності перелік місцезнаходжень решток хребетних тварин мезозою Луганської області.

1. Невідоме місцезнаходження. Верхній тріас (?): Луганська область, невідома свердловина, білуватоблакитний пісковик на глибині 30 м (інформацію наведено згідно з оригінальною етикеткою зразка). Зуб "примітивного крокодила хасматозухуса". Автором визначення очевидно є І.Г. Підоплічко. Фосилія експонується в Національному науково-природничому музеї НАН України. Дата зборів – 15.07.1950 р. Джерело інформації – фонди Національного науково-природничого музею. Крім того, дана фосилія згадується у роботі (Підоплічко, 1961).

За даними ряду робіт (Бланк і Малай, 1965; Резніков, 2003), тріасові відклади Луганської області належать до сріблянської світи, яка датується оленекським, анізійським та ладинським ярусами нижнього та середнього тріасу (Гожик, 2013). У зв'язку з цим верхньотріасовий вік решток викликає питання.

Даний зуб є, мабуть, єдиною фосилією хребетного з тріасових відкладів Донбасу. Під "примітивним крокодилем хасматозухусом", очевидно, мається на увазі великий напівводний крокодилоподібний хижак *Chasmatosaurus*, рештки якого відомі з нижнього тріасу Південної Африки, Індії та Китаю (Татарінов, 2009). Для підтвердження даного припущення необхідне детальне вивчення матеріалу відповідними спеціалістами.

2. Секменівка (= Вовчорівка). Верхня крейда, сеноманський ярус: Луганська область, Попаснянський район, с. Вовчорівка (с. Секменівка було поглинуте зазначеним селищем). Хребець іхтіозавра *Platypterygius* sp. (автор визначення невідомий). Фосилія експонується у Національному науково-природничому музеї НАН України. Дана скам'янілість, очевидно, походить із фосфоритонесних пісків секменівських верств слов'яногірської світи (нижній сеноман). Джерело інформації – фонди Національного науково-природничого музею.

3. Лисичанськ. Верхня крейда, сеноманський ярус: Луганська область, район м. Лисичанськ. Зуби акулорих (Oxyrhina (?)). Збори А.А. Сняtkова, визначення Б.Ф. Мефферта (1924). Місце зберігання матеріалу невідоме. Із сеноману околиць Лисичанська зуби риб наводить також Л.І. Лутугін (1893).

Судячи з наявних даних, місцезнаходження "Лисичанськ" та "Секменівка" є однаковими. Джерело інформації – роботи Б.Ф. Мефферта (1924) та Л.І. Лутугіна (1893).

4. Глафірівка. Верхня крейда, детритові вапняки та піски верхів верхнього сеноману – низів турону (так звана піщано-конгломератова пачка) (Гожик, 2013): Луганська область, Лутугинський район, виїмка залізної дороги в 2 км південніше с. Георгіївка. Зуби акул *Palaeocorax falcatus* (Agassiz), *Heterodontus* sp. (збори та

визначення М.І. Удовиченка). Щодо датування детритових вапняків є деякі розбіжності: О.А. Шевчук (2007) на основі вивчення спор, пилку та диноцистів відносить їх до сеноману; О.Д. Веклич (2008) вік даних порід за фауною форамініфер визначив як ранній турон. Матеріали зберігаються в особистій колекції М.І. Удовиченка. Джерело інформації – власні спостереження авторів.

5. Лутугине. Верхня крейда, міцні піщанисті вапняки з галькою та конгломерати верхів верхнього сеноману – низів турону ("піщано-конгломератова пачка") (Гожик, 2013): Луганська область, південна окраїна м. Лутугине, виїмка газопроводу біля зупиночного пункту "120 км" залізниці Волгоград–Харків. Невизначені зуби акулорих риб (збори та визначення М.І. Удовиченка). Вказані вище породи – це так звані конгломерати затоплення О. В. Савчинської. Їх детальна еколого-тафономічна характеристика наведена у роботі (Савчинская, 1982). Матеріали зберігаються в особистій колекції М.І. Удовиченка.

У цих же породах, що відслонюються в районі Зимогір'я та Слов'яносербська (ярок Глибокий, балка Омелькова, балка Вилковата) і на р. Білій (район шахти імені Лотікова), О.В. Савчинської відзначено зубні пластинки химер та скатів (зазначимо, що часто за зубні пластинки скатів О.В. Савчинська помилково приймала зуби акул *Ptychodus*). Джерело інформації – робота (Савчинская, 1982); власні спостереження.

6. Зимогір'я. Верхня крейда, глауконітові пісковики та галечники сеноманського ярусу: Луганська область, Слов'яносербський район, околиці станції Зимогір'я, ярк Глибокий. Зуби риб (збори та визначення О.В. Савчинської). Місце зберігання матеріалу невідоме. Джерело інформації – робота (Савчинская, 1982).

7. Хороше. Верхня крейда, мергелі кампанського (?) віку: Луганська область, Слов'яносербський район, с. Хороше. Тіла хребців та фрагмент нижньої щелепи невизначеного мозазаврида. Фосилія експонується в Національному науково-природничому музеї НАН України. Джерело інформації – фонди музею.

Із нижньомаастрихтських мергелів околиць с. Зимогір'я, що розташоване в 4 км на південний схід від Хорошого, рештки невизначених морських рептилій також зібрав місцевий палеонтолог-любитель В.Я. Коржов. Вік кісткового матеріалу визначено за знайденим разом з ним нижньомаастрихтським амонітом *Acanthoscaphites tridens* (Kner). Матеріали передані у Луганський обласний краєзнавчий музей. Джерело інформації – усне повідомлення В.Я. Коржова.

8. Невідоме місцезнаходження. Верхня крейда, мергелі: Луганська область, точне місцезнаходження невідоме. Фрагмент кінцівки морської рептилії. Збори П.І. Луцького. Фосилія експонується в Геологічному музеї Луганського національного університету. Джерело інформації – фонди Геологічного музею Луганського національного університету.

9. Балка Точильна (рис. 2, фіг. 2). Верхня крейда, верхній кампан, світлі кремнеземисті мергелі точильненської підсвіти сидорівської світи: Луганська область, Лутугинський район, кар'єр у нижній течії балки Точильної в 3 км на південний схід від окраїни с. Георгіївка. Скупчення кісток та луски кісткових риб на поверхнях нашарування мергелів. У цих же мергелях, що відслонюються в кар'єрі в 2 км на північний схід від с. Георгіївка (місцезнаходження "Георгіївка", на рис. 1 не позначене) також відзначено скупчення кісток та луски кісткових риб (рис. 3, фіг. 1–4, 6). Збори та визначення В.С. Дернова. Характер розміщення переважної більшості кісток та луски в породі дозволяє припустити, що вони є або зруйнованими водною динамікою копролітами або слідами життєдіяльності поліхет *Lepidenteron* (Biełkowska-Wasiluk et al., 2015). Присутність даних

іхнофосилій зафіксовано на інших місцезнаходженнях Донбасу, розташування яких, на жаль, невідоме (вивчені зразки не мали етикеток). Матеріали зберігаються в особистій колекції В.С. Дернова. Джерело інформації – власні спостереження.

10. Менчикур. Верхня крейда, верхній кампан, дрібно-детритовий вапняк, потужністю 0,3 м (*Бланк та Липник, 1962*), що залягає в основі георгіївської підсвіти сидорівської світи: Луганська область, Лутугинський район, лівий берег р. Вільхової, яр напроти с. Менчикур (сучасне с. Георгіївка). О.В. Савчинська збрала тут хребці акул та рептилій. Місце зберігання матеріалу невідоме. Джерело інформації – робота (*Бланк та Липник, 1962*).

11. Коноплянівка – 1 (рис. 2, фіг. 3; рис. 3, фіг. 5, рис. 4, фіг. 7). Верхня крейда, верхній кампан, детритові вапняки та піски георгіївської підсвіти сидорівської світи: Луганська область, Лутугинський район, діючий кар'єр у нижній течії балки Коноплянівка, в 1–2 км на пд. сх.-сх. від с. Георгіївка. Луска кісткових риб та зуби

акул (збори В.С. Дернова), зуби селяхій родини *Aplacogacidae* (збори та визначення М.І. Удовиченка), кістки черепа та перший шийний хребець мозазаврида (збори М.І. Удовиченка, визначення Л.О. Несова), уламок щелепи мозазаврида з кількома зубами (збори П.І. Луцького, визначення Л.О. Несова), уламок зуба мозазаврида (збори та визначення В.С. Дернова), уламок кістки пліозаврида (збори М.І. Удовиченка, визначення Є.О. Звонка). У нижній частині детритових вапняків, розкритих кар'єром у балці Точильній М.І. Удовиченком, знайдено фрагменти кісток черепах (визначення Є.О. Звонка). Матеріали зберігаються в особистих колекціях М.І. Удовиченка, Є.О. Звонка, В.С. Дернова, а також, очевидно, у Санкт-Петербурзькому університеті. Рештки хребетних на цьому рівні даного місцезнаходження відзначені також О.В. Савчинською (*Савчинская, 1982*). Джерело інформації – роботи (*Гликман и др., 1987*) та власні спостереження.



Рис. 2. Деякі місцезнаходження решток хребетних крейди Луганської області: фіг. 1 – мергелі місцезнаходження "Коноплянівка – 2"; фіг. 2 – місцезнаходження "Балка Точильна"; фіг. 3 – піски та вапняки місцезнаходження "Коноплянівка – 1"

12. Коноплянівка – 2 (рис. 2, фіг. 1). Верхня крейда, верхній кампан, глауконітові піски менчикурівської підсвіти сидорівської світи: Луганська область, Лутугинський район, невеликий яр, що впадає з правого схилу в балку Коноплянівку в 1 км на пн. сх. від с. Георгіївка. У кінці 60-х років минулого сторіччя М.І. Удовиченко знайшов тут фрагмент скелета мозазаврида, який через значну крихкість кісток не можна було виїняти з породи. Пробні розкопки, проведені у 2016 р., не дали результатів – судячи з усього, скелет було знищено у ході росту ярка. Тим не менш, даний стратиграфічний рівень є досить перспективним. Джерело інформації – власні спостереження.

13. Коноплянівка – 3. Верхня крейда, нижній маастрихт, глауконітові мергелі нижньої підсвіти коноплянівської світи: Луганська область, Лутугинський район, правий схил нижньої течії балки Коноплянівка, в 1,3 км на пд. сх.

від с. Георгіївка. Невеликий уламок лимонітизованої кістки, скупчення луски кісткових риб. Тут же відзначено утворення, попередньо визначене як копроліт морської рептилії. Колектор – В.С. Дернов (2018 р.). Матеріали зберігаються в особистій колекції В.С. Дернова. Рештки хребетних на цьому рівні даного місцезнаходження відзначені також О.В. Савчинською. Джерело інформації – робота (*Савчинская, 1982*) та власні спостереження.

14. Причепилівка. Верхня крейда, нижній маастрихт (*Плотникова и Якушин, 2001*), глауконітові піски кам'янобрідської світи: Луганська область, Слов'яносербський район, с. Причепилівка, балка Свиняча. Із гравійних прошарків у пісках визначено зуби акул: *Squatina* sp., *Heterodontus* sp., *Ptychodus* sp., *Paraorthacodus* sp., *Cretolamna* sp., *Scapanorhynchus* sp., *Anacoracidae* indet.; рештки кісткових риб: *Albuloidea*,

Enchodontidae; обкатані зуби крокодилів чи мозазаврид. Рештки хребетних перевідкладені з більш давніх відкладів верхньої крейди. Збори та визначення М.І. Удовиченка та Є.О. Звонка. Матеріали зберігаються в особистій колекції М.І. Удовиченка. Джерело інформації – робота (Удовиченко і Звонко, 1999).

15. Кримське. Верхня крейда, нижній маастрихт: Луганська область, Новоайдарський район, с. Кримське, яр на правому березі р. Сіверський Донець. У 1898 р. у глауконітових пісках Л.І. Лутугіним було знайдено майже повний скелет рептилії родини Mosasauridae, який, на жаль, значно постраждав при очистці від породи та транспортуванні (Лутугин, 1956). У 1901 р. М.М. Яковлев описав дані рештки і відніс їх до нового виду *Clidastes (?) lutugini* (Яковлев, 1901); у 1905 р. він же виділив новий рід *Dollosaurus* з типовим видом *D. lutugini* (Яковлев, 1905). Пізніше, в 1935 р., більш детальний опис був зроблений В.О. Цареградським. В останній час Д.В. Григор'євим (Grigoriev, 2013) було проведено повторне вивчення решток, знайдених Л.І. Лутугіним. Ним показано, що рід *Dollosaurus* є молодшим синонімом роду

Prognathodon. Матеріали зберігаються в Центральному науково-дослідному геологорозвідувальному музеї імені Ф.М. Чернишова (Санкт-Петербург, Росія). Джерело інформації – роботи (Луппов, 1949; Лутугин, 1956; Яковлев, 1901, 1905).

16. Коноплянівка – 4. Базальний галечник палеогену: Луганська область, Лутугинський район, правий схил балки Коноплянівка, в 1,5–2 км вгору за течією від с. Георгіївка. Перевідкладені обкатані уламки кісток мозазаврид (збори та визначення М.І. Удовиченка). Матеріали зберігаються в особистій колекції М.І. Удовиченка. Джерело інформації – власні спостереження.

17. Сватове (рис. 4, фіг. 1–6). Базальний галечник палеогену: Луганська область, кар'єр біля північної окраїни м. Сватове. Перевідкладені обкатані зуби акул, зубні пластинки химер, кістки мозазаврид та пліозаврид (збори Л.М. Королька, визначення М.І. Удовиченка). Матеріали експонуються у Сватівському краєзнавчому музеї. Джерело інформації – власні спостереження.



Рис. 3. Рештки кісткових риб з верхньокрейдових відкладів Луганської області:

хребець (фіг. 1; місцезнаходження "Георгіївка"); скупчення кісток та луски в мергелях (фіг. 2, 6; місцезнаходження "Георгіївка"); ізольована луска (фіг. 3; місцезнаходження "Георгіївка"); копроліт (?), складений лускою риб (фіг. 4; місцезнаходження "Георгіївка"); нірка декаподи зі стінками із луски кісткових риб (фіг. 5; місцезнаходження "Коноплянівка – 1"). Масштабна лінійка – 1 см



Рис. 4. Рештки верхньокрейдових морських рептилій (фіг. 1-4, 6), зубна пластина химери (фіг. 5) з базального галечнику палеогену (місцезнаходження "Сватове"), а також коронка зуба акули (фіг. 7) з пісків георгіївської підсвіти (місцезнаходження "Коноплянівка – 1"). Фосилії з експозиції Сватівського краєзнавчого музею, а також особистих колекцій авторів. Довжина масштабних відрізків 2 см (фіг. 1-5) та 1 см (фіг. 6, 7)

18. Красноріченськ. Базальний галечник палеогену: Луганська область, Кременський район, піщаний кар'єр біля с. Красноріченськ. Перевідкладені обкатані кістки мозазаврида та пліозаврида (збори та визначення М.І. Удовиченка). Матеріали зберігаються в особистій колекції М.І. Удовиченка, а також в Санкт-Петербурзькому університеті. Джерело інформації – власні спостереження.

19. Підгорівка. Базальний галечник палеогену: Луганська область, Старобільський район, околиці с. Підгорівка. Перевідкладені уламки кісток невизначених хребетних тварин. Джерело інформації – власні спостереження.

Обговорення результатів. Абсолютна більшість місцезнаходжень решток хребетних тварин Луганщини має пізньокрейдовий вік і лише одне – ранньо-середньотріасовий. Ця обставина викликана як значно більшими площами виходів на денну поверхню відкладів верхньої крейди, порівняно з тріасовими, так і з більшим ступенем

вивченості перших. Ймовірно, важливу роль також відіграли несприятливі тафономічні умови накопичення утворень тріасу.

Як видно з аналізу географічного поширення місцезнаходжень пізньокрейдових хребетних, майже всі вони приурочені до зони, що контактує з масивом кам'яновугільних відкладів (так званого відкритого карбону). Протягом значної частини пізньої крейди на місці Донецького кряжу знаходився острів чи навіть архіпелаг, у прибережній зоні якого були поширені мілководні обстановки з комфортними умовами існування для багатьох груп тварин, у т. ч. й різноманітних хребетних. З віддаленням від нього відклади стають все більш відкрито-морськими і в них різко знижується різноманіття викопної фауни. Наприклад, верхньокампанські крейдоподібні мергелі в районі с. Біловодськ вміщують лише ростири белемноїдей і дуже рідкісні фрагменти черепашок пелеципод.

Одновікові зі згаданими мергелями детритусові вапняки та піски в районі с. Георгіївка (на 90 км південніше Біловодська, тобто ближче до "відкритого карбону") вміщують численні рештки морських тварин різноманітних груп. Тому, окреслюючи коло перспективних на знаходження решток хребетних тварин районів слід пам'ятати про вказану вище закономірність їх розміщення.

Тріасові відклади Донбасу є зовсім не дослідженими у вказаному контексті, хоча їх потенціал дуже значний. Тим не менш, через малу площу виходів на денну поверхню відкладів тріасу в межах Луганщини, пошуки потрібного вести західніше – на Донеччині та Харківщині.

Висновки. Як показав аналіз стратиграфічного та географічного поширення місцезнаходжень решток хребетних на території Луганської області, переважна більшість з них приурочена до верхньокредових відкладів, що безпосередньо контактують з північною межею "відкритого карбону". Плануючи широкі пошуки решток хребетних тварин серед відкладів тріасу та верхньої крейди, слід пам'ятати, що ці дослідження мають бути комплексними і включати не тільки візуальний пошук решток, але також просіювання та промивку великих об'ємів порід задля вилучення дрібних та мікроскопічних фосилій та слідів життєдіяльності. Пошуки повинні супроводжуватися детальними палеоекологічними та тафономічними спостереженнями.

Подяки. Автори висловлюють щиру подяку завідувачу Сватівського краєзнавчого музею (м. Сватове, Луганська область) Л.М. Корольку за можливість вивчення музейних фондів та сприяння польовим дослідженням, краєзнавцю В.Я. Коржову (с. Зимогір'я, Луганська область) за надану інформацію щодо власних знахідок, а також Є.О. Звонку (м. Луганськ) за допомогу в польових роботах та визначення частини матеріалів.

Список використаних джерел

- Бланк, М.Я., Липник, О.С. (1962). До питання про граничні верстви між кампанським та маастрихтським ярусами на північній окраїні Донбасу. *Геологічний журнал*, XXII (4), 44–52.
- Бланк, М.Я., Малай, А.Г. (1965). Геологическая карта СССР масштаба 1 : 200 000. Серия Донбасская, лист М-37-XXVIII. Объяснительная записка. Москва: Недра.
- Веклич, О.Д. (2008). Нові дані про стратиграфію верхньокредових відкладів північної окраїни Донбасу (район с. Глафірівка). *Біостратиграфічні основи побудови стратиграфічних схем фанерозою України*, 119–120.
- Гликман, Л.С., Мертинене, Р.А., Несов, Л.А., Рождественский, А.К., Хозацкий, Л.И., Яковлев, Н.Н. (1987). Позвоночные. *Стратиграфия СССР. Меловая система. Полутом 2*. Москва: Недра, 255–262.
- Гожик, П.Ф. (Ред.). (2013). Стратиграфія верхнього протерозою та фанерозою України. Т. 1. Стратиграфія верхнього протерозою, палеозою та мезозою. Київ.
- Іванников, А.В., Пермяков, В.В. (1967). Стратиграфия и геологическое картирование мезозойских отложений Донбасса и Украинского щита. Киев: Наукова думка.
- Івахненко, М.Ф., Курочкин, Е.Н. (Ред.). (2008). Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы. Ч. 1. Москва: ГЕОС.
- Ковальчук, О.М. (2013). Випокні хребетні України. *Бібліографічний покажчик (1829–2012)*. Суми: Університетська книга.
- Курочкин, Е.Н., Лопатин, А.В. (Ред.). (2012). Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы. Ч. 2. Москва: ГЕОС.
- Курочкин, Е.Н., Лопатин, А.В., Зеленков, Н.В. (Ред.). (2015). Ископаемые позвоночные России и сопредельных стран. Ископаемые рептилии и птицы. Ч. 3. Москва: ГЕОС.
- Луппов, Н.Н. (1949). Атлас руководящих форм ископаемых фаун СССР. Т. IX. Верхний отдел меловой системы. Москва: Государственное издательство геологической литературы.
- Лутугин, Л.И. (1893). Геологические исследования окрестностей с. Лисичанска. *Известия Геологического комитета*, XII (3–4), 127–145.
- Лутугин, Л.И. (1956). Геологический разрез у с. Крымского (6-й роты) Славяносербского уезда, Екатеринославской губернии. В кн. Л.И. Лутугин *Избранные труды по геологии Донецкого бассейна*. К.: Издательство АН УССР, 99–106.
- Мефферт, Б.Ф. (1924). Геологический очерк Лисичанского района Донецкого бассейна. Л.: Изд. Геологического комитета.
- Несов, Л.А. (1995). Динозавры Северной Евразии: новые данные о составе комплексов, экологии и палеобиогеографии. Санкт-Петербург.

Несов, Л.А. (1997). Неморские позвоночные мелового периода Северной Евразии. Москва.

Пидопличко, И.Г. (1961). Изучение древних позвоночных Украины за 40 лет. *Сорок лет советской палеонтологии (1917–1957)*. Москва: Госгеолтехиздат, 84–91.

Плотникова, Л.Ф., Якушин, Л.Н. (2001). О возрасте стратотипических разрезов каменнородской свиты и причепиловских слоев Северного Донбасса. *Палеонтологические обобщения стратотипов фанерозою Украины*, 47–49.

Резников, А.И. (2003). Государственная геологическая карта Украины масштаба 1 : 200 000 аркуша М-37-XXII (Сватове). К.: Министерство экологии та природных ресурсов Украины.

Рождественский, А.К. (1973). Изучение меловых рептилий в СССР. *Палеонтологический журнал*, 2, 90–99.

Савчинская, О.В. (1982). Условия существования поздне меловой фауны Донецкого бассейна. Москва: Наука.

Татаринов, Л.П. (2009). Очерки по эволюции рептилий. Архозавры и зверообразные. Москва: ГЕОС.

Удовиченко, Н.И. (2008). Местонахождения палеогеновых позвоночных Луганской области. *Материали Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої 70-річчю від часу створення Луганської області. Природно-територіальні та суспільно-географічні комплекси регіонів: історія формування, стан, проблеми, перспективи*. 27–29 травня 2008 р., м. Луганськ, 63–65.

Удовиченко, Н.И., Звонко, Е.А. (1999). Ориктокомплексы верхнего маастрихта Северного Донбасса. *Природа Донецкого бассейна и проблемы ее изучения в школе, 13–15 сентября 1999*, 9–11.

Цареградский, В.А. (1935). Детальное описание мозазавра *Dollosaurus lutugini* Jak. *Ежегодник Всероссийского палеонтологического общества*, X (1931–1933), 49–54.

Шевчук, О.А. (2007). Палинологічна характеристика сеноманських відкладів Північного Донбасу (на прикладі розрізу Глафірівка). *Палеонтологічні дослідження в Україні: історія, сучасний стан та перспективи*, 181–183.

Яковлев, Н. (1901). Остатки мозазавра из верхнемеловых отложений юга России. *Известия Геологического Комитета*, XX (9), 507–520.

Яковлев, Н.Н. (1905). Заметки о мозазаврах. *Известия Геологического Комитета*, XXIV (10), 135–152.

Bienkowska-Wasiluk, M., Uchman, A., Jurkowska, A., Świerczewska-Gładysz, E. (2015). The trace fossil *Lepidenteron lewesiensis*: a taphonomic window on diversity of Late Cretaceous fishes. *Paläontologische Zeitschrift*, 89 (4), 795–806.

Grigoriev, D.V. (2013). Redescription of *Prognathodon lutugini* (Squamata, Mosasauridae). *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, 317 (3), 246–261.

Storrs, G.W., Arkhangelski, M.S., Efimov, V.M. (2000). Mesozoic marine reptiles of Russia and other former Soviet Republics. *The Age of Dinosaurs in Russia and Mongolia*, 187–209.

References

- Bienkowska-Wasiluk, M., Uchman, A., Jurkowska, A., Świerczewska-Gładysz, E. (2015). The trace fossil *Lepidenteron lewesiensis*: a taphonomic window on diversity of Late Cretaceous fishes. *Paläontologische Zeitschrift*, 89 (4), 795–806.
- Blank, M.Ya., Lipnik, O.S. (1962). On the issue of boundary strata between the Campanian and Maastrichtian stages on the northern outskirts of the Donets Basin. *Geological Journal*, XXII (4), 44–52. [in Ukrainian]
- Blank, M.Ya., Malay, A.G. (1965). Geological map of the USSR on a scale of 1 : 200 000. Donets Basin Series. Sheet M-37-XXVIII. Explanatory note. Moscow, Nedra. [in Russian]
- Glikman, A.L., Mertinene, R.A., Nesov, L.A., Rozhdestvensky, A.K., Khozatsky, L.I., Yakovlev, N.N. (1987). Vertebrates. *Stratigraphy of the USSR. Cretaceous system. Part 2*, 255–262. [in Russian]
- Gozhik, P.F. (Ed.). (2013). Stratigraphy of Upper Proterozoic, Paleozoic and Mesozoic of Ukraine. Vol. 1. Kyiv. [in Ukrainian]
- Grigoriev, D.V. (2013). Redescription of *Prognathodon lutugini* (Squamata, Mosasauridae). *Proceedings of the Zoological Institute RAS*, 317 (3), 246–261.
- Ivannikov, A.V., Permyakov, V.V. (1967). Stratigraphy and geological mapping of Mesozoic deposits of Donets Basin and the Ukrainian shield. Kiev: Naukova Dumka. [in Russian]
- Ivakhnenko, M.F., Kurochkin, Ye.N. (Eds.). (2008). Fossil vertebrates of Russia and adjacent countries. Fossil Reptiles and Birds. Part 1. Moscow: GEOS. [in Russian]
- Kurochkin, Ye.N., Lopatin, A.V. (Eds.). (2012). Fossil vertebrates of Russia and adjacent countries. Fossil Reptiles and Birds. Part 2. Moscow: GEOS. [in Russian]
- Kurochkin, Ye.N., Lopatin, A.V., Zelenkov, N.V. (Eds.). (2015). Fossil vertebrates of Russia and adjacent countries. Fossil Reptiles and Birds. Part 3. Moscow: GEOS. [in Russian]
- Kovalchuk, O.M. (2013). Fossil vertebrates of Ukraine. Bibliographic Index (1829–2012). Sumy, University book. [in Ukrainian]
- Luppov, N.N. (1949). Atlas of governing forms of fossil fauna of the USSR. Vol. IX. Upper part of the Cretaceous system. Moscow, State publishing house of geological literature. [in Russian]
- Lutugin, L.I. (1893). Geological studies of the surroundings with. Lischansk. *News of the Geological Committee*, XII (3–4), 127–145. [in Russian]
- Lutugin, L.I. (1956). Geological section at Krymskoye village (6th company) Slavyanoserbsk district, Yekaterinoslav province. In *Selected works on the geology of the Donets Basin*. Kiev: Publishing House of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 99–106. [in Russian]

Meffer, B.F. (1924). Geological essay on Lysychansk district of Donets Basin. Leningrad: Publishing House of the Geological Committee. [in Russian]

Nesov, L.A. (1995). Dinosaurs of Northern Eurasia: new data on the composition of the complexes, ecology and paleobiogeography. St. Petersburg. [in Russian]

Nesov, L.A. (1997). Non-marine vertebrates of the Cretaceous period of Northern Eurasia. Moscow. [in Russian]

Pidoplichko, I.G. (1961). The study of ancient vertebrates of Ukraine for 40 years. *Forty years of Soviet paleontology (1917-1957)*, 84-91. [in Russian]

Plotnikova, L.F., Yakushin, L.N. (2001). About the age of the stratotypical sections of the Kamenny brod suite and the Prichipilovka layers of the northern part of Donets Basin. *Paleontological justification of strata in the Phanerozoic of Ukraine*, 47-49. [in Russian]

Reznikov, A.I. (2003). State geological map of Ukraine scale 1: 200 000 sheet M-37-XXII (Svatove). Kyiv: Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. [in Ukrainian]

Rozhdestvensky, A.K. (1973). The study of Cretaceous reptiles in the USSR. *Paleontological Journal*, 2, 90-99. [in Russian]

Savchinskaya, O.V. (1982). The conditions of existence of the Late Cretaceous fauna of the Donets Basin. Moscow, Nauka. [in Russian]

Shevchuk, O.A. (2007). Palynological characteristics of the Cenomanian deposits of the Northern Donets Basin (on the example of the section

Glaifirivka) *Paleontological research in Ukraine: history, current state and prospects*, 181-183. [in Ukrainian]

Storrs, G.W., Arkhangel'ski, M.S., Efimov, V.M. (2000). Mesozoic marine reptiles of Russia and other former Soviet Republics. *The Age of Dinosaurs in Russia and Mongolia*, 187-209.

Tatarinov, L.P. (2009). Sketch of Reptile evolution. Archosaurs and Theromorphs. Moscow: GEOS. [in Russian]

Tsaregradsky, V.A. (1935). A detailed description of the Mosasaurus *Dollosaurus lutugini* Jak. *Yearbook of the All-Russian Paleontological Society*, X, 49-54. [in Russian]

Udovichenko, N.I. (2008). Locations of Paleogene vertebrates in the Luhansk region. *Materials of the All-Ukrainian National Scientific Practical Conference, attached to the 70th anniversary of the Lugansk Region. Naturally-Territorial and Suspended-Geographic Complex Regions: History of Formation, Mill, Problems, and Prospects. 27-29 April 2008, Lugansk*, 63-65. [in Russian]

Udovichenko, N.I., Zvonok, E.A. (1999). Oricotocomplexes of Upper Maastrichtian of Northern Donets Basin. *The nature of the Donets Basin and the problems of its study in school, Sept., 13-15, 1999, Lugansk*, 9-11. [in Russian]

Veklych, O.D. (2008). New data on the stratigraphy of the Upper Cretaceous deposits of the northern outskirts of the Donets Basin (district of Glafirovka village). *Biostratigraphic bases for the construction of stratigraphic schemes by Phanerozoic of Ukraine*, 119-120. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 15.10.19

V. Dernov, PhD student

E-mail: vitalydernov@gmail.com,

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,

55 b O. Gonchar Str., Kiev, 01054, Ukraine;

M. Udovichenko, PhD (Geol.-Min.), Assoc. Prof.

E-mail: triakis26@gmail.com,

Lugansk Taras Shevchenko National University,

1 Gogol Sqv., Starobil's'k, 91011, Ukraine

SITES OF MESOZOIC VERTEBRATES ON THE TERRITORY OF LUGANSK REGION (UKRAINE)

The purpose of the work is to determine the state of study and the prospects for further research on the vertebrate animals remains from the Mesozoic deposits of the Lugansk region. To achieve this goal, collection and generalization of information on the locations of vertebral remains among the Mesozoic deposits of Lugansk region were made. Despite the considerable amount of findings of various groups of Mesozoic vertebrates remains in the Donets Basin territories adjoining them, their systematic and purposeful study, unfortunately, was not conducted in Lugansk region, although indications of the findings of the Mesozoic vertebrates remains in the Luhansk region occur quite often.

As a result of the processing of published materials and preliminary interpretation of field observations, a list of 20 sites located mainly on the right bank of the Siversky Donets within the Lugansk region is compiled. Almost all the places are confined to the Upper Cretaceous deposits, much less – to the basal layers of the Paleogene and only one to the Triassic.

The vast majority of the locations of the Upper Cretaceous are confined to the area in contact with an array of coal deposits (the so-called "open Carboniferous"). Outwards from it, the rocks are more open-sea and they drastically reduce the diversity of the fossil fauna. Therefore, outlining the range of promising areas regarding finding vertebrate animals remains one should be aware of the above-mentioned pattern of their placement. Triassic deposits of the Donbas are not at all investigated for finding the remains of vertebrates, although their potential is very significant. Nevertheless, due to the small area of the Triassic deposits outcrop in the Lugansk region, searches need to be directed to the west – in the Donetsk and Kharkiv regions.

Keywords: vertebrates, Lugansk region, Mesozoic, location.

B. Дернов, асп.

E-mail: vitalydernov@gmail.com,

Институт геологических наук НАН Украины,

ул. О. Гончара, 55-б, г. Киев, 01054, Украина;

М. Удовиченко, канд. геол.-минералог. наук, доц.

-mail: triakis26@gmail.com,

Луганский национальный университет имени Тараса Шевченко,

пл. Гоголя, 1, г. Старобельск, 91011, Украина

МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ ОСТАТКОВ МЕЗОЗОЙСКИХ ПОЗВОНОЧНЫХ НА ТЕРРИТОРИИ ЛУГАНСКОЙ ОБЛАСТИ (УКРАИНА)

Цель работы заключается в определении состояния изученности и перспектив дальнейших исследований остатков позвоночных животных из мезозойских отложений Луганской области. Для достижения поставленной цели был проведен сбор и обобщение информации о местонахождениях остатков позвоночных среди мезозойских отложений Луганщины. Несмотря на значительное количество находок остатков различных групп мезозойских позвоночных животных на сопредельных с Донбассом территориях, их систематическим и целенаправленным изучением на Луганщине, к сожалению, никто не занимался, хотя сообщения о находках остатков мезозойских позвоночных на ее территории встречаются довольно часто.

В результате изучения опубликованных материалов и предварительной интерпретации полевых наблюдений, составлен перечень из 20 местонахождений, расположенных преимущественно на правобережье Северского Донца в пределах Луганской области. Почти все местонахождения приурочены к верхнемеловым отложениям, значительно меньше – к базальным слоям палеогена и лишь одно – к триасовым.

Подавляющее большинство местонахождений верхнемелового возраста приурочено к зоне, контактирующей с массивом каменноугольных отложений (так называемого открытого карбона). По мере удаления от него породы становятся все более открыто-морскими и в них резко снижается разнообразие ископаемой фауны. Поэтому, очерчивая круг перспективных нахождение остатков позвоночных животных районов, следует помнить об указанной выше закономерности их размещения. Триасовые отложения Донбасса являются практически не исследованными на предмет нахождения остатков позвоночных животных, хотя их потенциал очень значителен. Но из-за малой площади выходов на дневную поверхность отложений триаса в пределах Луганщины, поиски нужно вести западнее – в Донецкой и Харьковской областях.

Ключевые слова: позвоночные животные, Луганская область, мезозой, местонахождения.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 548/549.61

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.03>

I. Квасниця, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: ikvasnytsya@gmail.com,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
НАН "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
В. Квасниця, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: vmkvas@hotmail.com,
Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення
імені М.П. Семененка НАН України,
пр. Акад. Палладіна, 34, м. Київ, 03680, Україна

ПРОСТІ ФОРМИ КРИСТАЛІВ ЦИРКОНУ ІЗ КРИСТАЛІЧНИХ ПОРІД
УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА ТА ЇХ МОРФОЛОГІЧНІ ТИПИ

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

Стисло викладено основні розробки з геометричної кристалографії циркону, напрацьовані багатьма дослідниками у XVIII–XX століттях. Узагальнено дані гоніометричних досліджень циркону із кристалічних порід Українського щита (УЩ). Вони охоплюють циркон переважно з гранітів і лужних порід більшості мегаблоків УЩ. Набір простих форм габітусного значення на кристалах циркону невеликий: {111}, {110}, {100}, {221}, {331} і {311}. Ці форми визначають два різко протилежні габітуси кристалів циркону: призматичний і дипірамідальний. Серед призматичних кристалів розрізняються декілька основних морфологічних типів кристалів: {110}+{111} – цирконовий, {100}+{111} – гіацинтовий, {110}+{100}+{111}, {110}+{100}+{111}+{311} і {110}+{100}+{311} – різновиди проміжного гіацинтово-цирконового типу. Серед дипірамідальних кристалів контрастні два морфологічні типи: огранені дипірамідою {111} і комбінацією дипірамід {111}+{331}+{221}. Проста форма {111} розвинена майже на всіх кристалах циркону із кристалічних порід УЩ, за винятком випадків, коли вона повністю витісняється на головках кристалів дитетрагональною дипірамідою {311}. Для кристалів циркону із сієнітів, маріуполітів, альбітитів і деяких пегматитів форма {111} є габітусною. Проста форма призма {110} також розвинена майже на всіх кристалах циркону із кристалічних порід УЩ, за винятком багатьох дипірамідальних {111} кристалів із сієнітів Жовтневого масиву і кристалів циркону гіацинтового типу. Вона визначає найбільш поширений морфологічний тип кристалів циркону призматичного габітусу – цирконовий. Проста форма призма {100} менш поширена на кристалах циркону із кристалічних порід УЩ, ніж форма {110}. Вона характеризує гіацинтовий морфологічний тип кристалів циркону призматичного габітусу і властива циркону із гранітів Приазов'я і Середнього Придніпров'я. Проста форма {311} є добре розвинутою на кристалах циркону гіацинтово-цирконового типу із гранітів і майже відсутня на дипірамідальних кристалах циркону із лужних порід. Прості форми {221} і {331} добре розвинені лише на дипірамідальних кристалах із сієнітів, маріуполітів, альбітитів і деяких пегматитів Приазов'я. Особливо вони характерні для кристалів циркону Азовського родовища. Проста форма пінакоїд {001} рідкісна і слабо розвинена, виявлена лише на кристалах циркону призматичного габітусу із бейфорситів Чернігівського масиву і на дипірамідальних кристалах із сієнітів цього ж масиву. Ще дві дипіраміди {101} і {211} можна віднести до достовірних простих форм на кристалах циркону із кристалічних порід УЩ. Однак вони є рідкісними і виявлені лише на кристалах циркону із кислих порід. Інші гоніометрично заміряні прості форми на кристалах циркону із різних порід УЩ є слабо розвиненими і часто неповнозакритими, їх достовірність підлягає сумніву, і тому вони не прийняті нами для розгляду. Наведені дані про прості форми, габітуси і основні морфологічні типи кристалів циркону із кристалічних порід УЩ майже повністю підтверджують основні положення про морфологічні і структурні основи кристаломорфології циркону. Насамперед це стосується двох контрастних габітусних типів кристалів циркону: переважно в лужних породах ростуть дипірамідальні кристали, у кислих породах – різні морфологічні типи призматичних кристалів. Загалом набір, ступінь важливості і поширення простих форм на кристалах циркону із кристалічних порід УЩ відповідає морфологічним і структурним рядам кристалів цього мінералу. У той же час розмаїття морфологічних типів призматичних кристалів циркону із гранітів ще немає належного пояснення. Поки що можна констатувати, що кожний петрологічний тип граніту може характеризуватися певним морфологічним типом чи типами призматичних кристалів циркону. Дипірамідальний циркон із більшості проявів лужних порід УЩ молодший призматичного циркону із кислих порід щита. Циркони із сієнітів Яструбецького і Жовтневого масивів та Азовського родовища мають палеопротерозойський вік близько 1770 млн років. Він характеризує єдиний етап палеопротерозойського лужного магматизму, потужно проявленого на УЩ і багатого на рідкоземельну геохімічну спеціалізацію. Саме у цих породах поширені і навіть домінують (у маріуполітах Жовтневого масиву і сієнітах Азовського родовища) дипірамідальні циркони. Циркони із сієнітів і карбонатитів Чернігівського масиву, серед яких трапляються більш рідкісні дипірамідальні кристали, значно давніші – близько 2 млрд років. Циркони із кислих порід УЩ утворені переважно у період 2,2–1,8 млрд років. Дипірамідальний циркон на УЩ є докембрійським утворенням, який відображає відносно вузький у часі палеопротерозойський етап історії УЩ. Такий циркон трапляється у неогенових і четвертинних теригенних відкладах південно-західної частини УЩ, що може свідчити про наявність на цій території ще невідомих палеопротерозойських джерел лужного магматизму. Дипірамідальні кристали циркону також можуть належати різним альбітизованим породам та пегматитам кислих і лужних порід.

Ключові слова: циркон, кристаломорфологія, прості форми, морфологічні типи, Український щит.

Вступ. Циркон – один із найпоширеніших акцесорних мінералів, він зустрічається майже в усіх типах порід: магматичних, метаморфічних, осадових. Тому він є важливим мінералом, насамперед, для з'ясування генезису кристалічних порід, кореляційних побудов, радіогеохронологічних досліджень, визначення областей зносу, пошуків корінних родовищ і, власне, як корисна копалина. Саме тому він є одним із досить добре вивчених мінералів.

Одна й досить наочна особливість циркону – це форма виділень мінералу. Він належить до відносно рідкісних мінералів, які часто ростуть у вигляді багатогранників. Хоч вважається, що циркон утворюється на всіх стадіях кристалізації породи: як в умовах вільного,

так і утрудненого росту. Загальне пояснення високого ступеня ідіоморфізму виділень циркону криється в значній кристалізаційній силі мінералу, яка зумовлена компактністю і відносною простотою його структури, сильними зв'язками між катіонами тощо.

Загалом для циркону характерні як поодинокі кристали (від дрібних до 10 см і більше), так і їх зростки, рідше зерна. Утворює він і найрізноманітніші агрегати, найтиповішими серед яких є агрегати неправильної форми, пластиноподібні, частково радіально-променисті (малакон, циртоліт та інші рідкісноземельні різновиди), а також землисті скупчення та натічні форми (аршинвіт) (Мінерали, 1972).

Численні літературні дані з морфології циркону свідчать про велику інформативність кристаломорфологічного аспекту досліджень, розглядаючи останній як джерело відомостей щодо умов кристалізації порід, що його вміщують. Систематичне вивчення типоморфізму форми циркону призвело до створення так званої Пюлін-діаграми (Pupin, 1980), яка хоч і зазнає критики, проте широко використовується при вивченні генезису магматичних утворень.

Мета роботи – викласти морфологічні і структурні засади кристалографії циркону і, на цій основі, зробити аналіз простих форм кристалів циркону із кристалічних порід УЩ та виділити основні морфологічні типи кристалів циркону залежно від петрологічного типу породи. Зауважимо, що при дослідженні кристалів циркону донині частіше використовується метод візуального порівняння його морфології з відомими опублікованими даними, у т. ч. із підручників і різних мінералогічних і кристалографічних довідників, найчастіше з Атласу кристалічних форм В. Гольдшміда (Goldschmidt, 1923). Таке вивчення морфології багатогранників циркону не може вважатися коректним. Зокрема це стосується й вивчення кристаломорфології циркону із кристалічних порід УЩ. Можна навести небагато ґрунтовних публікацій про гоніометричні дослідження кристалів циркону із кристалічних порід УЩ (Крочук, 1984; Крочук і Верхогляд, 1986; Крочук і Лесная, 1986; Крочук і др., 1989; Легкова і др., 1993; Пономаренко, 2001; Квасниця та ін., 2016). Тому при кристаломорфологічному аналізі циркону із кристалічних порід УЩ ми насамперед орієнтувалися на результати гоніометричних досліджень цього мінералу. Хоч такими інструментальними дослідженнями кристалів циркону охоплено відносно мало петрологічних типів порід УЩ, проте вони наглядно демонструють тенденцію зміни форми кристалів циркону залежно від породи.

Зразки і методи дослідження. Протягом багатьох років ми вивчали кристаломорфологію циркону з різних кристалічних порід на Волинському, Середньопридніпровському і Приазовському мегаблоках УЩ, використовуючи при цьому гоніометрію і растрову електронну мікроскопію. Кристали циркону були заміряні на двокружному гоніометрі ГД-1, при розрахунках простих форм кристалів циркону застосована їх морфологічна установка. Електронно-мікроскопічні дослідження кристалів циркону проведені останніми роками в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України (м. Київ) на растровому електронному мікроскопі JSM-6700F, обладнаному енергодисперсійною системою для мікроаналізу JED-2300 (JEOL, Японія). Отримання РЕМ-зображень кристалів циркону здійснювалось за прискорювальної напруги 15 кВ, струму зонда $6 \cdot 10^{-10}$ А та діаметра зонда 1–2 мкм.

Морфологічні і структурні основи кристалографії циркону. Морфологія кристалів будь-якого мінералу визначається внутрішніми (структура кристалів, наявність у них дислокацій і границь двійникування тощо) і зовнішніми (температура, тиск, ступінь пересичення і структурний стан середовища мінералоутворення, характер рухливості мінералотвірних компонентів, елементи-домішки тощо) чинниками. Саме структура мінералу зумовлює ідеальну чи теоретичну морфологію його кристалів, а всі відхилення від неї пов'язані з впливом на їх структуру перелічених зовнішніх чинників. Все разом визначає механізм росту і швидкість переміщення граней кристалу, що є причиною особливостей його зовнішньої і внутрішньої морфології.

Морфологічні основи кристалографії циркону були закладені у період, що охоплює кінець XVIII, XIX і початок XX століття. Результати гоніометричних досліджень

циркону, отримані у той час багатьма мінералогами і кристалографами, були підсумовані В.М. Гольдшмідом у 9 томі Атласу кристалічних форм за 1923 р. (Goldschmidt, 1923). Він містить 13 таблиць з 158 зображеннями кристалів циркону, а у текстовій частині – перелік ідентифікованих простих форм на кристалах циркону та інформацію про географію знахідок цих кристалів, яка охоплює майже всі континенти і багато країн. Надано список літературних джерел, проте у томі відсутні дані про материнські джерела кристалів циркону.

В.М. Гольдшмід розділив всі виявлені прості форми на кристалах циркону на головні, рідкісні та малодостовірні. У число 11 головних форм віднесені: {001}, {010}, {110}, {011}, {112}, {111}, {221}, {331}, {131}, {141} і {151}. У число рідкісних і малодостовірних форм увійшли: {130}, {031}, {041}, {051}, {071}, {113}, {559}, {14.14.25}, {554}, {332}, {553}, {774}, {11.11.6}, {773}, {552}, {16.16.5}, {551}, {881}, {991}, {355}, {455}, {766}, {655}, {544}. Всі вище вказані головні форми складають різні комбінації на малюнках кристалів циркону в Атласі (Goldschmidt, 1923). Нами проаналізовано (Квасниця, 2014), що серед габітусних типів кристалів циркону в Атласі переважають призматичні і дипірамідально-призматичні кристали, дипірамідальні кристали відносно рідкісні.

Як відомо, структура циркону зумовлює його кристалізацію в дитетрагонально-дипірамідальному виді симетрії тетрагональної сингонії, в якому можливі п'ять типів простих форм: пінакоїд, тетрагональні призми, дитетрагональні призми, тетрагональні дипіраміди і дитетрагональні дипіраміди. Тобто передбачається багато простих форм. Але якщо звернутися до відомих і найбільш повних мінералогічних і кристалографічних довідників (Goldschmidt, 1923; Минералы, 1982), то кількість виявлених найчастіших достовірних простих форм на кристалах циркону невелика – до 15, що й було зафіксовано ще В.М. Гольдшмідом. Поширених форм габітусного значення ще менше – серед них домінують дві тетрагональні призми {110} і {100}, одна тетрагональна дипіраміда {111} і одна дитетрагональна дипіраміда {311}. Це особливо добре видно із аналізу частоти і ступеня розвитку простих форм на кристалах циркону, зображених в Атласі (Goldschmidt, 1923), домінуючими є такі форми: {111}, {110} і {100}, менш значущі {311}, {101}, {331} і {221}. Наш статистичний аналіз поширеності головних форм на кристалах циркону, зображених у цьому Атласі, дозволяє запропонувати такий морфологічний ряд їх важливості: {111}, {110}, {100}, {311}, {331}, {101}, {221}, {511}, {411} і {001}. Раніше подібна серія морфологічного значення простих форм циркону була отримана І.І. Шафрановським (Минералы, 1972): {111}, {110}, {100}, {311}, {331} і {101}. Близький ряд важливості простих форм циркону, виходячи з особливостей його структури, визначив П. Хартман (Hartman, 1956): {111}, {110}, {100}, {211}, {331}, {112}.

Згідно з концепцією П. Хартмана і В. Пердока (Hartman and Perdok, 1955) про визначальний чинник періодичних ланцюжків зв'язку (ПЛЗ), у структурі мінералу лише дві форми {111} і {110} на кристалах циркону можуть бути утворені так званими F-гранями. Ці форми є структурно найбільш важливими, оскільки паралельні двом векторам найміцніших зв'язків у кристалах циркону, їх грані мають власні піраміди росту, вони утворюються шарами і тому їх поверхня плоска і гладенька. Всі інші форми на кристалах циркону менш структурно важливі і мали би бути вираженими S- і K-гранями – із східчастими і шорсткими (кустастими) поверхнями відповідно. Тому в ідеальних умовах росту кристали циркону повинні покриватися лише гранями двох форм

{111} і {110}. Габітусні типи таких кристалів повинні визначатися ступенем розвитку граней цих форм – від дипірамідальних, дипірамідално-призматичних до призматичних і відрізнятися видовженням по головній кристалографічній осі [001]. Однак майже всі виявлені прості форми на кристалах циркону представлені плоскими гранями. Такі відхилення (розвиток плоских граней більшості простих форм, зміна порядку їх важливості) свідчать про суттєвий вплив середовища мінералоутворення на форму кристалів циркону. Навіть при відносно ідеальних умовах росту існує конкуренція розвитку між структурно найважливішими формами циркону {111} і {110} і обумовлена вона зовнішнім фактором – відповідно до однієї з версій надлишком чи дефіцитом SiO_2 у кристалізаційному середовищі. Стосовно іншої огранки кристалів циркону, то, наприклад, ріст плоских граней такої поширеної форми, як {100} і рідкісної форми пінакоїда {001}, пояснюється адсорбцією поверхні кристалу під час його росту протонів, атомів фтору, молекул води і комплексів кремнію (Woensdregt, 2012). Завдяки такій адсорбції, при певному стані кисню в середовищі мінералоутворення, частина SiO_4 -комплексів може бути замінена на комплекси з участю $(\text{OH})_4$ і F_4 . Тоді порушуються Zr-Si-Zr зв'язки і зростає роль можливих Zr-OH-Zr, Zr-F-Zr і Zr-(OH,F)-Zr зв'язків. При таких замінах можуть виникати нові ПЛЗ. Ці додаткові сильні зв'язки змінюють S-характер граней на їх F-характер, тобто ці грані починають рости шарами. Передбачається, що поглинання домішок зростаючим кристалом також може бути причиною створення нових сильних зв'язків паралельно {331}, що сприяє пошаровому росту граней цієї форми (Woensdregt, 2012).

Безсумнівна теза – габітусна форма {111} характерна для кристалів циркону із лужних порід. У той же час вона була отримана шляхом гідротермального синтезу циркону із розчинів кислого складу, тоді як при синтезі з розчинів з лужними елементами виростили призматичні кристали циркону (Caruba, 1978). Додавання калію і натрію до розчину кислого складу приводило до зміни дипірамідального габітусу на призматичний габітус кристалів циркону. У сульфатній системі виростили дипірамідальні {111} кристали, навіть коли затравкою були його призматичні кристали. Таким чином, із результатів гідротермального синтезу видно, що вплив калію і натрію на ріст дипірамідальних кристалів циркону не є вирішальним. Тим не менше, саме у сієнітах і альбітитах найбільш поширені дипірамідальні кристали циркону.

Із аналізу структури мінералу видно, що у кристалах циркону поверхня граней дипіраміди {111} окупована негативними іонами кремнію чи позитивними іонами цирконію, а поверхня граней призми {110} складена іонами кисню належних до іонів кремнію. Тому передбачають, що можливою перешкодою для росту призматичних граней міг бути надлишок кремнезему в сильно пересичених лугами

розплавах, а також, що вміст SiO_2 у мінералотвірній системі впливає як на габітус, так і на обрис кристалів циркону. Однак до кінця нез'ясованим залишається питання яким конкретно чином вміст SiO_2 визначає форму кристалів циркону. Ще одним чинником впливу на розвиток форми {110} може бути швидкість кристалізації циркону. Вона відображається у співвідношенні видовження призматичного кристалу до його ширини, яке є змінним від 1 до 5. Також залишається відкритим питання, як такі структурні і неструктурні елементи-домішки у кристалах циркону, як Hf, U, Th і РЗЕ, могли впливати на його форму. На кристалогенетичній схемі циркону І. Костова (Костов, 1978) важлива роль відводиться саме вмісту U, Th, РЗЕ і H_2O . Вважається, що дипірамідальні {111} кристали циркону відносно збагачені U і Th та збіднені Hf порівняно з призматичними кристалами.

Нарешті, слід зауважити, що дещо спрощена інтерпретація форм кристалів циркону – взаємозв'язок відносного розвитку граней призми {110} з температурою кристалізації та швидкістю росту кристалів, а граней дипіраміди {111} з хімічними факторами – ставиться під сумнів (Varva, 1993). Запропоновано більш складну залежність, яка пов'язує відносні швидкості росту граней простих форм кристалів циркону з кристалізаційною кінетикою середовища мінералоутворення. Автори (Benisek and Finger, 1993; Corfu et al., 2003) також вважають, що саме сукупність факторів істотно впливає на розвиток граней призми {110} на кристалах циркону.

Зважаючи, що морфологія кристалів циркону добре відома, складено морфолічні і структурні ряди важливості їх простих форм і теоретично обґрунтовано появу на кристалах циркону плоских граней форм {111}, {110}, {100}, {331} і {001}. В анатомічних зрізах кристалів циркону із гранітів ми спостерігали також зональність по {311} – пошаровий ріст граней {311}.

Результати досліджень, обговорення і висновки.

Як і в багатьох мінералогічних провінціях світу циркон поширений у різних магматичних, метаморфічних і осадових породах України, проте він найбільш часто трапляється в нефелінових сієнітах, сієнітах та їх пегматитах, гранітах та їх пегматитах. Циркон утворює в цих породах майже ідеальні тетрагональні багатогранники: в кислих гірських породах часто виростають видовжені і переважно призматичні кристали, а в більш лужних породах – коротші дипірамідальні кристали.

Нижче у таблиці зібрано наші і літературні дані гоніометричних досліджень циркону із кристалічних порід УЩ. Вони охоплюють циркон переважно з гранітів і лужних порід більшості мегаблоків щита, оскільки гоніометрично не вивчено циркон із більшості метаморфічних і осадових порід щита, за деякими винятками, наприклад, циркон з ендербітів Дністерсько-Бузького мегаблоку і палеопротерозойських пісковиків Білорівницької западини на Волинському мегаблоці.

Таблиця

Прості форми кристалів циркону із кристалічних порід Українського щита

Мегаблок УЩ, масив, комплекс, родовище	Порода	Прості форми кристалів циркону		Габітус і морфологічний тип кристалів циркону
		Основні	Другорядні	
Волинський, Яструбецький масив	Сієніт	{110}, {111}	{331}, {100}, {110}	Призматичний – цирконовий, зрідка дипірамідальний
Інгуло-Інгулецький, Великописківський масив	Сієніт	{110}, {111}	{311}, {331}, {221}, {100}	Призматичний – цирконовий, зрідка дипірамідално-призматичний
Приазовський, Жовтневий масив	Сієніт нефеліновий (маріуполіт), альбітит	Макрокристали, їх розміри 6-12 мм: {111}	{110}, {100}, {221}, {331}	Дипірамідальний
Приазовський, Азовське родовище	Сієніт	Макрокристали, їх розміри 6-15 мм: {111}, {221}, {331}, {110} Мікрোকристали (до 0,5 мм): {110}, {111}	{110} {331}, {311}, {100}	Дипірамідальний Призматичний – цирконовий

Закінчення табл.

Приазовський, Чернігівський масив	Сієніт	{111}, {221}	{110}, {221}, {331}, {551}, {553}, {311}, {001}	Дипірамідальний
Приазовський, Чернігівський масив	Карбонатити	{110}, {111}	{221}, {331}, {441}, {551}, {553}, {554}, {774}, {100}, {001}, {311}	Призматичний – цирконовий
Волинський, Пержанський комплекс	Апограніт пержанський	{111}, {110}	{100}, {221}, {553}	Призматичний – цирконовий
Волинський, Пержанський комплекс	Граніт хочинський	{110}, {111}	{100}, {331}, {101}	Призматичний – цирконовий
Волинський, Коростенський комплекс	Граніт лизниківський	{110}, {111}	{100}, {331}, {221}, {311}	Призматичний – переважно цирконовий
Волинський, Коростенський комплекс	Граніт рапаківі малинський	{110}, {111}	{311}, {331}, {101}, {221}, {302}, {301}, {210}	Призматичний – цирконовий
Волинський, Житомирський комплекс	Граніт	{100}, {110}, {111}, {311}	{331}	Призматичний – цирконово-гіацинтовий, гіацинтовий і цирконовий
Волинський, Осницький комплекс	Граніт	{110}, {100}, {111}	{311}	Призматичний – цирконовий, цирконово-гіацинтовий і гіацинтовий
Дністерсько-Бузький, Літинський комплекс	Ендербіт	{110}, {100}, {311}	{111}, {101}	Призматичний – цирконовий
Росинсько-Тікицький	Граніт корнінський	{110}, {100}, {311}, {111}		Призматичний – гіацинтово-цирконовий
Росинсько-Тікицький, Звенигородський комплекс	Діорит	{110}, {100}, {311}, {111}	{331}	Призматичний – цирконовий і гіацинтово-цирконовий
Росинсько-Тікицький	Біотит-амфіболовий гнейс	{100}, {110}, {111}	{311}	Призматичний – переважно гіацинтовий і гіацинтово-цирконовий
Росинсько-Тікицький, Тетіївський комплекс	Біотитовий мігматит	{110}, {100}, {311}, {111}	{331}	Призматичний – цирконовий і гіацинтово-цирконовий
Середньо-придніпровський	Граніт саксаганський	{100}, {110}, {111}, {311}	{311}	Призматичний – переважно гіацинтовий і гіацинтово-цирконовий
Середньо-придніпровський	Граніт токівський	{100}, {110}, {111}	{311}	Призматичний – переважно гіацинтовий і гіацинтово-цирконовий
Середньо-придніпровський	Тоналіт	{110}, {100}, {211}, {101}		Призматичний – гіацинтово-цирконовий
Середньо-придніпровський	Кристалосланець	{110}, {100}, {211}, {101}		Призматичний – цирконовий
Приазовський, Кам'яномогильський, Стародубовський і Скатеринівський масиви	Граніт	{110}, {100}, {111}	{311}	Призматичний – цирконовий і гіацинтовий
Приазовський, Салтичанський комплекс	Граніт	{110}, {100}, {311}, {111}	{331}	Призматичний – переважно цирконово-гіацинтовий
Приазовський, Анадольський комплекс	Граніт	{100}, {110}, {311}, {111}		Призматичний – переважно гіацинтовий і гіацинтово-цирконовий

У таблиці враховані дані статей (Крочук, 1984; Крочук і Верхогляд, 1986; Крочук і Лесная, 1986; Крочук і др., 1989; Легкова і др., 1993; Пономаренко, 2001; Квасниця та ін., 2016), а також дані з монографічних видань (Мінералогія вивержених комплексів..., 1960; Мінералогія Криворозжого басейна, 1977; Мінералогія Приазов'я, 1981; Мінерали України, 1990; Матковський і др., 2009). Більшість вивчених кристалів циркону має розмір по видовженню від 0,1 до 0,3-0,5 мм.

Як видно із таблиці, набір простих форм габітусного значення на вивчених кристалах циркону невеликий: дипіраміда {111}, призми {110} і {100}, дипіраміди {221}, {331} і {311}. Ці форми визначають два контрастні габітуси кристалів циркону: призматичний і дипірамідальний. Серед призматичних кристалів розрізняються декілька основних морфологічних типів кристалів: {110}+{111} – цирконовий, {100}+{111} – гіацинтовий, {110}+{100}+{111}, {110}+{100}+{111}+{311} і {110}+{100}+{311} – різновиди проміжного гіацинтово-цирконового (рис. 1).

Проста форма {111} розвинена майже на всіх кристалах циркону із кристалічних порід УЩ, за винятком випадків, коли вона повністю витісняється на головках кристалів дитетрагональною дипірамідою {311}. Для кристалів циркону із сієнітів, маріуполітів, альбітітів і деяких пегматитів ця форма є габітусною. Проста форма {110} також розвинена майже на всіх кристалах циркону із кристалічних порід УЩ, за винятком багатьох дипірамідальних кристалів {111} із сієнітів Жовтневого масиву (рис. 2)

і кристалів циркону гіацинтового типу. Вона визначає поширений морфологічний тип кристалів циркону призматичного габітусу – цирконовий. Проста форма {100} трохи менш поширена на кристалах циркону із кристалічних порід УЩ, ніж форма {110}. Вона характеризує гіацинтовий морфологічний тип кристалів циркону призматичного габітусу і властива циркону із гранітів Приазов'я і Середнього Придніпров'я. Проста форма {311} є добре розвинутою на кристалах циркону гіацинтово-цирконового типу із гранітів і майже відсутня на дипірамідальних кристалах циркону із лужних порід.

Прості форми {221} і {331} добре розвинені лише на дипірамідальних кристалах із сієнітів, маріуполітів, альбітітів і деяких пегматитів Приазов'я. Особливо вони характерні для кристалів циркону Азовського родовища (рис. 3, 4). Проста форма пінакоїд {001} рідкісна і слабо розвинена, виявлена В.М. Крочуком лише на кристалах циркону призматичного габітусу із бейфорситів Чернігівського масиву і на

дипірамідальних кристалах із сієнітів цього ж масиву (Крочук, 1984). Ще дві дипіраміди $\{101\}$ і $\{211\}$ можна віднести до достовірних простих форм на кристалах циркону із кристалічних порід УЩ. Однак вони є також рідкісними і виявлені лише на кристалах циркону з кислих порід. Подекуди вони трапляються у комбінації, утворюючи специфічні кристали циркону в тоналіті і кристалосланці Середнього Придніпров'я (Легкова *и др.*, 1993). Інші гоніометрично заміряні прості форми на кристалах циркону із різних порід Українського щита є надзвичайно слабо розвиненими і часто неповногранними, їх достовірність підлягає сумніву і тому вони не прийняті нами для розгляду.

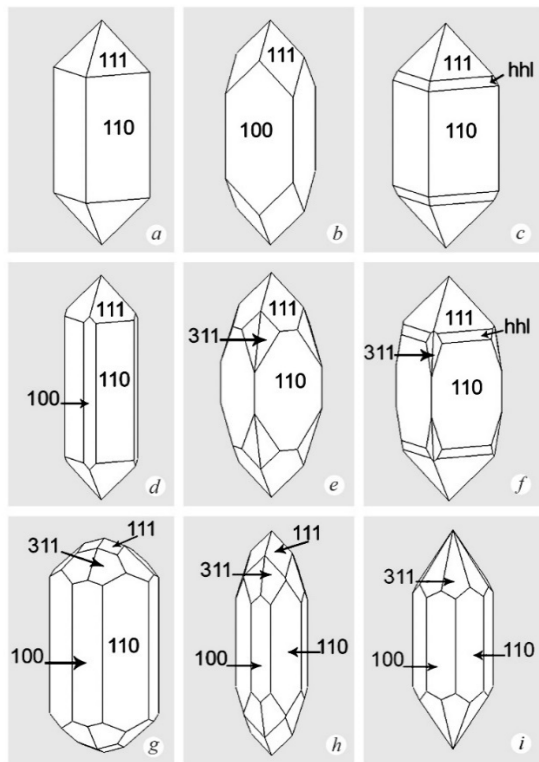


Рис. 1. Морфологічні типи кристалів циркону на прикладі циркону із білокоровицьких протерозойських пісковиків (Вишневецький *та ін.*, 2015):

a – цирконовий, b – гіацинтовий, c-f – різновиди цирконового типу, g-i – різновиди проміжного гіацинтового-цирконового типу

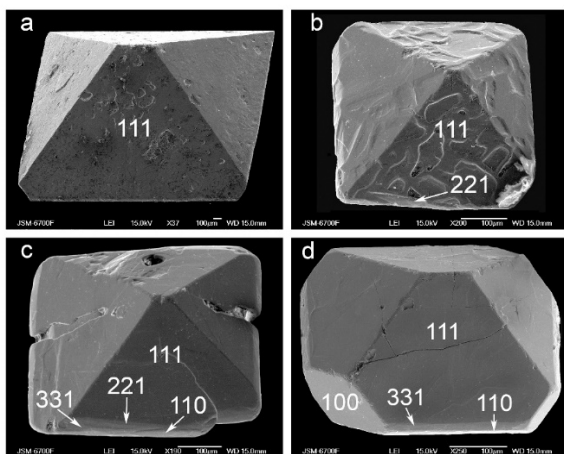


Рис. 2. Різновиди дипірамідальних макрокристалів циркону із сієнітів Жовтневого масиву (Квасниця *та ін.*, 2016).

Комбінації простих форм на кристалах: a – $\{111\}$, b – $\{111\} + \{221\}$, c – $\{111\} + \{110\} + \{221\} + \{331\}$, d – $\{111\} + \{110\} + \{331\} + \{100\}$

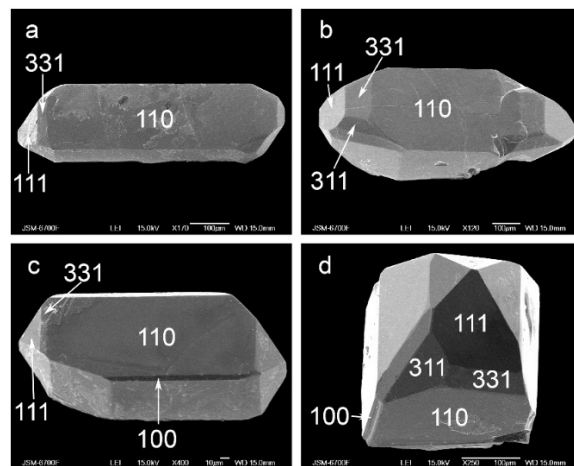


Рис. 3. Форма $\{331\}$ на мікрокристалах циркону із сієнітів Азовського родовища (Квасниця *та ін.*, 2016).

Комбінації простих форм на кристалах: a – $\{111\} + \{110\} + \{331\}$, b – $\{111\} + \{110\} + \{331\} + \{311\}$, c – $\{111\} + \{110\} + \{100\} + \{331\}$, d – $\{111\} + \{110\} + \{331\} + \{100\} + \{311\}$

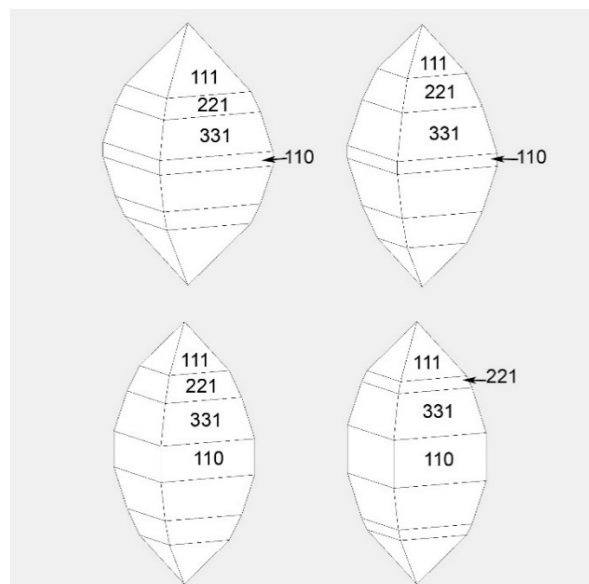


Рис. 4. Різновиди дипірамідальних макрокристалів циркону із сієнітів Азовського родовища з неоднаковим розвитком граней дипірамід $\{111\}$, $\{221\}$, $\{331\}$ і призми $\{110\}$ (Квасниця *та ін.*, 2016)

Наведені у таблиці дані про прості форми, габітуси і основні морфологічні типи кристалів циркону із кристалічних порід УЩ майже повністю підтверджують викладені вище основні положення про морфологічні і структурні основи кристаломорфології циркону. Насамперед це стосується двох контрастних габітусних типів кристалів циркону: в лужних породах часто ростуть дипірамідальні кристали, у кислих породах – різні морфологічні типи призматичних кристалів. Загалом набір, ступінь важливості і поширення простих форм на кристалах циркону із кристалічних порід УЩ також відповідає вищенаведеним основам та морфологічним і структурним рядам кристалів цього мінералу. У той же час розмаїття морфологічних типів призматичних кристалів циркону із гранітів ще не має належного пояснення. Поки що можна констатувати, що кожний петрологічний тип граніту може характеризуватися певним морфологічним типом призматичних форм циркону. Наприклад, для граніту рапаківі характерний цирконовий морфологічний тип кристалів циркону, тоді як у токівському граніті домінують кристали циркону гіацинтового типу. Чинники такого розмаїття потрібно

шукати у хімічних особливостях мінералотвірного середовища для материнських порід, які можуть впливати на появу менш структурно важливих форм, таких як {100}, {311}, {211}, {221}, {331}, {101} і {001}.

Важливо, що дипірамідальний циркон із більшості проявів лужних порід УЩ молодший призматичного циркону із кислих порід щита. Так, циркони із сієнітів Яструбецького, Азовського і Жовтневого масивів мають палеопротерозойський вік близько 1770 млн років (Левашова, 2018). Він характеризує єдиний етап палеопротерозойського лужного магматизму, потужно проявленого на Українському щиті і багатого на рідкоземельну геохімічну спеціалізацію. Саме у цих породах поширені і навіть домінують (у маріуполітах Жовтневого масиву і сієнітах Азовського родовища) дипірамідальні циркони. Циркони із сієнітів і карбонатитів Чернігівського масиву, серед яких трапляються більш рідкісні дипірамідальні кристали, значно давніші – близько 2 млрд років. Циркони із кислих порід УЩ утворені переважно в період 2,2–1,8 млрд років. Тобто дипірамідальний циркон на Українському щиті є докембрійським утворенням, який відображає відносно вузький у часі палеопротерозойський етап історії УЩ. Такий циркон трапляється у неогенових і четвертинних теригених відкладах південно-західної частини УЩ, що може свідчити про наявність на цій території ще невідомих палеопротерозойських джерел лужного магматизму. Проте дипірамідальні кристали також з'являються в різних альбітизованих породах та у пегматитах кислих і лужних порід.

Наприкінці також окреслимо декілька проблемних питань щодо кристаломорфології циркону з різних кристалічних порід УЩ. Незадовільно вивчена гоніометрично кристаломорфологія циркону із метаморфічних і осадових порід щита. Зовсім не відома кристаломорфологія циркону більш молодого протерозойського (<1700 млн років) і фанерозойського віку, наявність якого зафіксована радіологічним методом у неогенових титано-цирконієвих розсипах УЩ дослідженнями С.М. Цимбала. Майже відсутня кореляція анатомії і зовнішньої огранки кристалів циркону, яка би базувалася на основі інструментальних досліджень. Тобто як слід не простежена еволюція форми кристалів циркону в процесі росту із різних порід. Створення такої схеми кореляції суттєво доповнило би дослідження метаморфічних і детритових цирконів, що проводяться з метою реконструкції геологічних обставин їх утворення та визначення областей зносу. Оскільки відхилення від порядку важливості і розвитку плоских граней більшості простих форм вказують на суттєвий вплив середовища мінералоутворення на форму кристалів, то необхідним є детальний аналіз поширення всіх виявлених простих форм та їх комбінацій на кристалах циркону, який поки що не виконано. Відкритим залишається питання про рідкісну форму на кристалах циркону – пінакоїд. Коли все таки грані цієї форми ускладнюють габітус його кристалів? Зауважимо також, що популярна кристалогенетична схема циркону І. Костова (Костов, 1971), в основі якої лежить швидкість росту його кристалів і захоплення ними елементів-домішок, є суперечливою. Вона, як і відома морфологічна класифікація циркону Д. Пюпіна (Pupin, 1980), не відображає всього розмаїття морфології кристалів мінералу. Навіть з переліку вищезначених питань зрозуміло, що розробка положень типоморфізму форми кристалів циркону із кристалічних порід УЩ ще далека від завершення.

Список використаних джерел

Вишневецький, О.А., Квасниця, В.М., Квасниця, І.В., Шумлянський, Л.В., Гурненко, І.В. (2015). Циркон із білокоровицьких протерозойських пісковиків (кристаломорфологія, анатомія, хімічний склад, мінеральні включення, генезис). *Записки Укр. мінерал. тов-ва*, 12, 88–102.

Квасниця, В.М., Вишневецький, О.А., Квасниця, І.В., Гурненко, І.В. (2016). Дипірамідальні макрокристали циркону із лужних порід Приазов'я. *Мінерал. журнал*, 38, 3, 9–23.

Квасниця, І.В. (2014). Проблемні питання геометричної кристалографії циркону. *Тези Міжнародної наукової конференції "Роль вищих навчальних закладів у розвитку геології", Київ*, 86–88.

Костов, І. (1978). Морфология и генезис минералов. В сб. Региональная и генетическая минералогия, вып. 2. К.: Наукова думка, 3–15.

Крочук, В.М. (1984). Кристалломорфология циркона из пород Черниговского карбонатитового комплекса. *Мінерал. журнал*, 6, 4, 65–70.

Крочук, В.М., Верхогляд, В.М. (1986). Кристалломорфология циркона из плагиогранитов западного склона Украинского щита как критерий их генетической принадлежности. *Докл. АН УССР, сер. Б*, 4, 16–19.

Крочук, В.М., Лесная, И.М. (1986). Кристаллогенезис циркона из эндробитов Побужья. *Докл. АН УССР, сер. Б*, 5, 8–10.

Крочук, В.М., Легкова, Г.В., Галабурда, Ю.А., Орса, В.И., Усова, Л.В. (1989). Кристаллогенезис циркона из сиєнітов Корсунь-Новомиргородского плутона (Украинский щит). *Мінерал. журнал*, 11, 6, 18–29.

Левашова, Е.В. (2018). Геохимия редких элементов в цирконе из щелочных пород с редкоземельной минерализацией (Украинский щит). *Дис. ... канд. геол.-минералог. наук*. Санкт-Петербург.

Легкова, Г.В., Крочук, В.М., Усова, Л.В., Орса, В.И. (1993). Геологическая интерпретация данных по кристалломорфологии и химии цирконов из раннекембрийских образований Среднего Приднепровья. *Мінерал. журнал*, 15, 5, 60–69.

Матковский, О., Павлишин, В., Сливко, Е. (2009). Основы минералогии Украины. Львів: ВЦ ЛНУ ім. Івана Франка.

Мінералогія вивержених комплексів Західної Волині. (1960). Відп. ред. Є.К. Лазаренко. Львів: Вид-во Львів. ун-ту.

Мінералогія Криворозжского бассейна. (1977). Отв. ред. Е.К. Лазаренко. К.: Наукова думка.

Мінералогія Приазов'я. (1981). Отв. ред. Е.К. Лазаренко. К.: Наукова думка.

Мінералы. (1972). Справочник. Т. 3, вып. 1. Силикаты с одиночными и сдвоенными тетраэдрами. Отв. ред. Ф.В. Чухров. М.: Наука.

Мінералы Украины. (1990). Краткий справочник. Отв. ред. Н.П. Щербак. К.: Наукова думка.

Пономаренко, О.М. (2001). Морфолого-анатомічний аналіз кристалів циркону в ізотопно-геохронологічних дослідженнях. *Мінерал. журнал*, 23, 4, 77–88.

Benisek, A., Finger, F. (1993). Factors controlling the development of prism faces in granite zircons: A microprobe study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 114, 441–451.

Caruba, R. (1978). Morphologie de zircons synthetiques: correlations petrogenetiques. *Can. Miner.*, 16, 315–323.

Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., Kinny, P. (2003). Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 469–500.

Goldschmidt, V. (1923). Atlas der Krystallformen. Band IX. Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung, Tafeln 101–113; Text, 145–154.

Hartman, P. (1956). The morphology of zircon and potassium dihydrogen phosphate in relation to the crystal structure. *Acta Cryst.*, 9, 721–727.

Hartman, P., Perdok, G. (1955). On the relationship between structure and morphology of crystals. *Acta Cryst.*, 8, 525–529.

Pupin, J. P. (1980). Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73, 207–220.

Varva, G. (1993). A guide to quantitative morphology of accessory zircon. *Chem. Geol.*, 110, 15–28.

Woensdrecht, C.F. (2012). Structural morphology of alkali feldspars and zircon and oriented intergrowths causing asterism in gemstones. *Geologica Ultraiectina*, 72, 1–139.

References

Benisek, A., Finger, F. (1993). Factors controlling the development of prism faces in granite zircons: A microprobe study. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 114, 441–451.

Caruba, R. (1978). Morphologie de zircons synthetiques: correlations petrogenetiques. *Can. Miner.*, 16, 315–323.

Corfu, F., Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., Kinny, P. (2003). Atlas of zircon textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53, 469–500.

Goldschmidt, V. (1923). Atlas der Krystallformen. Band IX. Heidelberg: Carl Winters Universitätsbuchhandlung.

Hartman, P. (1956). The morphology of zircon and potassium dihydrogen phosphate in relation to the crystal structure. *Acta Cryst.*, 9, 721–727.

Hartman, P., Perdok, G. (1955). On the relationship between structure and morphology of crystals. *Acta Cryst.*, 8, 525–529.

Kostov, I. (1978). The morphology and genesis of minerals. In *Regional and genetic mineralogy*, v. 2. Kyiv: Nauk. Dumka, 3–15. [in Russian]

Krochuk, V.M. (1984). Crystal morphology of zircon from rocks of the Chernigov carbonate complex. *Mineral. J.*, 6, 4, 65–70. [in Russian]

Krochuk, V.M., Legkova, G.V., Galaburda, Yu.A., Orsa, V.I., Usova, L.V. (1989). Crystal genesis of zircon from syenites of the Korsun-Novomirgorod pluton (the Ukrainian Shield). *Mineral. J.*, 11, 6, 18–29. [in Russian]

Krochuk, V.M., Lesnaya, I.M. (1986). Crystal genesis of zircon from enderbites of the Pobuzhzhia region. *Reports NAS of UkrSSR, Ser. B*, 5, 8–10. [in Russian]

Krochuk, V.M., Verkhoglyad, V.M. (1986). Crystal morphology of zircon from plagiogranites of the western slope of the Ukrainian Shield as a criterion of their genetic identity. *Reports NAS of UkrSSR, Ser. B*, 4, 16–19. [in Russian]

Kvasnytsia, I.V. (2014). Problematic questions of geometric crystallography of zircon. Abstracts of the International Scientific Conference

"The Role of Higher Educational Institutions in the Development of Geology", Kyiv, 86-88. [in Ukrainian]

Kvasnytsya, V.M., Vyshnevsky, O.A., Kvasnytsia, I.V., Gurnenko, I.V. (2016). Dipyramidal zircon macrocrystals from alkaline rocks of the Azov Sea region. *Mineral. J.*, 38, 3, 9-23. [in Ukrainian]

Legkova, G.V., Krochuk, V.M., Usova, L.V., Orsa, V.I. (1993). Geological interpretation of data on crystal morphology and chemistry of zircon from early Precambrian formations of the Middle Dnipro region. *Mineral. J.*, 15, 5, 60-69. [in Russian]

Levashova, E.V. (2018). Geochemistry of rare elements in zircon from alkaline rocks with rare-earth mineralization (the Ukrainian Shield). *Dis. ... Cand. Geol.-Min. Sciences*. St. Petersburg. [in Russian]

Matkovsky, O., Pavlyshyn, V., Slyvko, Ye. (2009). Fundamentals of mineralogy of Ukraine. Lviv: Ivan Franko LNUi. [in Ukrainian]

Mineralogy of the Azov Sea region (1981). Lazarenko E.K. (Eds.). Kyiv: Nauk. Dumka. [in Russian]

Mineralogy of the eruptive complexes of Western Volyn' (1960). Lazarenko E.K. (Eds.). Lviv: Lviv University. [in Ukrainian]

Mineralogy of the Kryvyi Rih Basin (1977). Lazarenko E.K. (Eds.). Kyiv: Nauk. Dumka. [in Russian].

Minerals. (1972). Reference book. Vol. 3, iss. 1. Silicates with single and double tetrahedra, Chukhrov F.V. (Eds.). Moscow: Nauka. [in Russian]

Minerals of Ukraine. (1990). Reference book. Shcherbak N.P. (Eds.). Kyiv: Nauk. Dumka. [in Russian]

Ponomarenko, O.M. (2001). Morphologically-anatomical analysis of zircon crystals in isotopic-geochronological studies. *Mineral. J.*, 23, 4, 77-88. [in Ukrainian]

Pupin, J.P. (1980). Zircon and granite petrology. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73, 207-220.

Varva, G. (1993). A guide to quantitative morphology of accessory zircon. *Chem. Geol.*, 110, 15-28.

Vyshnevsky, O.A., Kvasnytsya, V.M., Kvasnytsia, I.V., Shumlyansky, L.V., Gurnenko, I.V. (2015). Zircon from Bilokorovychi Proterozoic sandstones (crystal morphology, anatomy, chemical composition, mineral inclusions, genesis). *Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society*, 12, 88-102. [in Ukrainian]

Woensdregt, C.F. (2012). Structural morphology of alkali feldspars and zircon and oriented intergrowths causing asterism in gemstones. *Geologica Ultraiectina*, 72, 1-139.

Надійшла до редколегії 04.12.19

I. Kvasnytsya, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,

E-mail: ikvasnytsya@gmail.com

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

V. Kvasnytsya, Dr.Sci. (Geol.-Min.), Prof.,

E-mail: vmkvas@hotmail.com,

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,

34 Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

SIMPLE FORMS OF ZIRCON CRYSTALS FROM CRYSTALLINE ROCKS OF THE UKRAINIAN SHIELD AND THEIR MORPHOLOGICAL TYPES

The main basics in geometric crystallography of zircon, developed by many researchers in the 18th - 20th centuries, are briefly described. The data of goniometric study of zircon from crystalline rocks of the Ukrainian Shield (USH) are summarized. They cover zircon predominantly from granites and alkaline rocks of most the USH megablocks. The set of habit simple forms on zircon crystals is small: {111}, {110}, {100}, {221}, {331} and {311}. These forms define two contrasting habits of zircon crystals - prismatic and dipyramidal. Among the prismatic crystals several main morphological types of crystals are distinguished: {110} + {111} - zircon type, {100} + {111} - hyacinth type, {110} + {100} + {111}, {110} + {100} + {111} + {311} and {110} + {100} + {311} - intermediate hyacinth-zircon types. Among the dipyramidal crystals two morphological types are contrasting - faceted by {111} dipyramid and {111} + {331} + {221} dipyramid combinations. The simple form {111} is developed on almost all zircon crystals from crystalline rocks of the USH, unless it is completely displaced on the heads of the crystals by the ditetragonal dipyramid {311}. For zircon crystals from syenites, mariupolites, albitites and some pegmatites the {111} is habit form. The simple form prism {110} is also developed on almost all zircon crystals from crystalline rocks of the USH, with the exception of many {111} dipyramidal crystals from syenites of the Zhovtnevy massif and hyacinth type of zircon crystals. It determines the most common morphological type of zircon crystals of prismatic habit - zircon type. The simple form prism {100} is less common on zircon crystals from crystalline rocks of the USH than the form {110}. It determines the hyacinth morphological type of zircon crystals of a prismatic habit. It is characteristic of zircon from granites of the Azov and Middle Dnipro regions. The simple form {311} is well developed on zircon crystals of hyacinth-zircon type from granites. It is almost absent on dipyramidal zircon crystals from alkaline rocks. The simple forms {221} and {331} are well developed only on dipyramidal crystals from syenites, mariupolites, albitites and some pegmatites of the Azov region. They are especially characteristic of zircon crystals of the Azov deposit. The simple form pinacoid {001} is rare and poorly developed; it was found only on zircon crystals of a prismatic habit from carbonatites of the Chernigiv massif and on dipyramidal crystals from syenites of the same massif. Another two dipyramids {101} and {211} can be attributed to reliable simple forms on zircon crystals from crystalline rocks of the USH. However, they are rare and found only on zircon crystals from acid rocks. Other goniometrically studied simple forms are poorly developed and incomplete, their reliability is questionable and therefore not accepted by us for consideration. The data presented on simple forms, habits and the main morphological types of zircon crystals from crystalline rocks of the USH almost completely confirm the main points on the morphological and structural bases of the crystallography of zircon. First of all, this concerns two contrasting habit types of zircon crystals: dipyramidal crystals grow mainly in alkaline rocks and various morphological types of prismatic crystals grow in acidic rocks. In general, the set, the degree of importance and the distribution of simple forms on zircon crystals from crystalline rocks of the USH correspond to the morphological and structural series of crystals of this mineral. At the same time, the diversity of the morphological types of prismatic zircon crystals from granites still does not have a proper explanation. For the time being, it can be stated that each petrological type of granite can be characterized by a specific morphological type or types of prismatic zircon crystals. The dipyramidal zircon from most manifestations of alkaline rocks of the USH is younger than prismatic zircon from acidic rocks of the USH. Zircons from syenites of the Yastrubetsky and Zhovtnevy massifs and the Azov deposit have a Paleoproterozoic age of ~1770 Ma. It characterizes the only stage of Paleoproterozoic alkaline magmatism, powerfully manifested in the USH and rich in rare-earth geochemical specialization. Dipyramidal zircons in these rocks are prevalent and even dominate (in mariupolites of the Zhovtnevy massif and syenites of the Azov deposit). Zircons from syenites and carbonatites of the Chernigiv massif, among which there are more rare dipyramidal crystals, are much more ancient - about 2000 Ma. Zircons from acidic rocks of the USH formed mainly in the period of 2.2-1.8 billion years. The dipyramidal zircon on the USH is a Precambrian formation, which reflects the Paleoproterozoic stage of the USH history, which is relatively narrow in time. Such zircon occurs in the Neogene and Quaternary terrigenous sediments of the southwestern part of the USH, which may indicate the presence in this area of still unknown Paleoproterozoic sources of alkaline magmatism. Dipyramidal zircon crystals may also belong to different albitized rocks and pegmatites of acidic and alkaline rocks.

Keywords: zircon, crystallography, simple forms, morphological types, the Ukrainian Shield.

И. Квасница, канд. геол. наук, доц.,

E-mail: ikvasnytsya@gmail.com

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;

В. Квасница, д-р геол.-минералог. наук, проф.,

E-mail: vmkvas@hotmail.com,

Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семененко НАН Украины,

пр. Акад. Палладина, 34, г. Киев, 03680, Украина

ПРОСТЫЕ ФОРМЫ КРИСТАЛЛОВ ЦИРКОНА ИЗ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОД УКРАИНСКОГО ЩИТА И ИХ МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ

Кратко изложены основные разработки по геометрической кристаллографии циркона, наработанные многими исследователями в XVIII-XX столетиях. Обобщены данные гониометрических исследований циркона из кристаллических пород Украинского щита (УЩ). Они охватывают циркон преимущественно из гранитов и щелочных пород большинства мегаблоков УЩ. Набор простых форм габитусного значения на кристаллах циркона небольшой: {111}, {110}, {100}, {221}, {331} и {311}. Эти формы определяют два контрастных габитуса кристаллов циркона: призматический и дипирамидальный. Среди призматических кристаллов различаются несколько основных морфологических типов кристаллов: {110} + {111} - цирконовый, {100} + {111} - гиацинтовый, {110} + {100} + {111}, {110} + {100} + {111} + {311} и {110} + {100} + {311} - промежуточные гиацинтово-цирконовые типы. Среди дипирамидальных кристаллов два морфологических типа являются контрастными - фасетированный {111} дипирамидом и {111} + {331} + {221} дипирамидными комбинациями. Простая форма {111} развита на почти всех цирконных кристаллах из кристаллических пород УЩ, за исключением тех, где она полностью вытеснена на головках кристаллов дитетрагональным дипирамидом {311}. Для цирконных кристаллов из сиенитов, мариуполитов, албититов и некоторых pegmatites форма {111} является габитусной. Простая форма призма {110} также развита на почти всех цирконных кристаллах из кристаллических пород УЩ, за исключением многих {111} дипирамидальных кристаллов из сиенитов Жовтневського масиву і гіацинтового типу кристаллов циркону. Визначає найбільш поширений морфологічний тип кристалів циркону призматичного габітусу - цирконовий тип. Проста форма призма {100} менш поширена на цирконних кристаллах з кристалічних порід УЩ, ніж форма {110}. Визначає гіацинтовий морфологічний тип кристалів циркону призматичного габітусу. Він є характерним для циркону з гранітів Азовського та Середньодніпровських регіонів. Проста форма {311} добре розвита на цирконних кристаллах гіацинтово-цирконового типу з гранітів. Вона майже відсутня на дипірамідальних цирконних кристаллах з алкаліїчних порід. Прості форми {221} і {331} добре розвита тільки на дипірамідальних кристаллах з сиєнітів, мариуполітів, албітітів і деяких pegmatites Азовського регіону. Вони є особливо характерними для цирконних кристалів Азовського родовища. Проста форма пінакоїду {001} рідка і слабо розвита; її знайдено тільки на цирконних кристаллах призматичного габітусу з карбонатитами Чернігівського масиву і на дипірамідальних кристаллах з сиєнітів того ж масиву. Ще два дипіраміди {101} і {211} можна віднести до надійних простих форм на цирконних кристаллах з кристалічних порід УЩ. Однак, вони є рідкими і знайдені тільки на цирконних кристаллах з кислотними породами. Інші гоніометрично досліджені прості форми слабо розвита і неповні, їх надійність є сумнівним і тому не прийнята нами для розгляду. Дані, представлені про прості форми, габітуси та основні морфологічні типи цирконних кристалів з кристалічних порід УЩ майже повністю підтверджують основні положення кристаллографії циркону. По-перше, це стосується двох контрастних типів габітусу цирконних кристалів: дипірамідальні кристали ростуть переважно в алкаліїчних породах, а різні морфологічні типи призматичних кристалів - в кислотних породах. Загалом, набір, ступінь важливості та розподіл простих форм на цирконних кристаллах з кристалічних порід УЩ відповідає морфологічній та структурній послідовності кристалів цього мінералу. В той же час, різноманітність морфологічних типів призматичних цирконних кристалів з гранітів ще не має належного пояснення. На даний час можна сказати, що кожен петрологічний тип граніту можна характеризувати певним морфологічним типом або типами призматичних цирконних кристалів. Дипірамідальний циркон з більшості проявів алкаліїчних порід УЩ молодший за призматичний циркон з кислотних порід УЩ. Циркон з сиєнітів Яструбецького та Жовтневських масивів і Азовського родовища має палеопротерозойський вік ~1770 Ма. Він характеризує єдиний етап палеопротерозойського алкаліїчного магматизму, потужно проявлений в УЩ і багатий на рідкісний геохімічний спеціалізацію. Дипірамідальні циркони в цих породах поширені і навіть домінують (в мариуполітах Жовтневського масиву і сиєнітах Азовського родовища). Циркони з сиєнітів і карбонатитів Чернігівського масиву, серед яких є рідкісні дипірамідальні кристали, значно старіші - близько 2000 Ма. Циркони з кислотних порід УЩ утворилися переважно в період 2,2-1,8 млрд років. Дипірамідальний циркон на УЩ є праймобричним утворенням, яке відображає праймобричний етап історії УЩ, який є відносно вузьким за часом. Такий циркон зустрічається в неогеному і кватернярних терригенних осадових породах західно-західної частини УЩ, що може свідчити про наявність в цій області ще невідомих палеопротерозойських джерел алкаліїчного магматизму. Дипірамідальні цирконні кристали також можуть належати до різних албітізованих порід і pegmatites кислотних і алкаліїчних порід.

+ {311} и {110} + {100} + {311} – разновидности промежуточного гиацинтово-цирконового типа. Среди дипирамидальных кристаллов выделяются два морфологических типа – ограниченные дипирамидой {111} и комбинацией дипирамид {111} + {331} + {221}. Простая форма {111} развита почти на всех кристаллах циркона из кристаллических пород УЩ, за исключением случаев, когда она полностью вытесняется на головках кристаллов дитетрагональной дипирамидой {311}. Для кристаллов циркона из сиенитов, мариуполитов, альбититов и некоторых пегматитов форма {111} является габитусной. Простая форма призма {110} также развита почти на всех кристаллах циркона из кристаллических пород УЩ, за исключением многих дипирамидальных кристаллов {111} из сиенитов Октябрьского массива и кристаллов циркона гиацинтового типа. Она определяет наиболее распространенный морфологический тип кристаллов циркона призматического габитуса – цирконовый. Простая форма призма {100} менее распространена на кристаллах циркона из кристаллических пород УЩ, чем форма {110}. Она позволяет распознавать гиацинтовый морфологический тип кристаллов циркона призматического габитуса и характерна для циркона из гранитов Приазовья и Среднего Приднепровья. Простая форма {311} хорошо развита на кристаллах циркона гиацинтово-цирконового типа из гранитов и почти отсутствует на дипирамидальных кристаллах циркона из щелочных пород. Простые формы {221} и {331} хорошо развиты только на дипирамидальных кристаллах из сиенитов, мариуполитов, альбититов и некоторых пегматитов Приазовья. Особенно они характерны для кристаллов циркона Азовского месторождения. Простая форма пинакOID {001} редкая и слабо развита, обнаружена лишь на кристаллах циркона призматического габитуса с бефорситов Черниговского массива и на дипирамидальных кристаллах из сиенитов этого же массива. Еще две дипирамиды {101} и {211} можно отнести к достоверным простым формам на кристаллах циркона из кристаллических пород УЩ. Однако они являются редкими и обнаружены лишь на кристаллах циркона из кислых пород. Другие гониометрически изученные простые формы слабо развиты и неполногранные, их достоверность подлежит сомнению и поэтому они не приняты нами для рассмотрения. Приведенные данные о простых формах, габитусах и основных морфологических типах кристаллов циркона из кристаллических пород УЩ почти полностью подтверждают основные положения о морфологических и структурных основах кристалломорфологии циркона. Прежде всего это касается двух контрастных габитусных типов кристаллов циркона: преимущественно в щелочных породах растут дипирамидальные кристаллы, в кислых породах – различные морфологические типы призматических кристаллов. В общем набор, степень важности и распространение простых форм на кристаллах циркона из кристаллических пород УЩ соответствует морфологическим и структурным рядам кристаллов этого минерала. В то же время разнообразию морфологических типов призматических кристаллов циркона из гранитов еще нет должного объяснения. Пока можно констатировать, что каждый петрологический тип гранита может характеризоваться определенным морфологическим типом или типами призматических кристаллов циркона. Дипирамидальный циркон из большинства проявлений щелочных пород УЩ моложе призматического циркона из кислых пород щита. Цирконы из сиенитов Яструбецкого и Октябрьского массивов и Азовского месторождения имеют палеопротерозойский возраст – ~1770 млн лет. Он характеризует единственный этап палеопротерозойского щелочного магматизма, мощно проявленного на УЩ и богатого на редкоземельную геохимическую специализацию. Именно в этих породах распространены и даже доминируют (в мариуполитах Октябрьского массива и сиенитах Азовского месторождения) дипирамидальные цирконы. Цирконы из сиенитов и карбонатитов Черниговского массива, среди которых встречаются более редкие дипирамидальные кристаллы, гораздо более древние – около 2 млрд лет. Цирконы из кислых пород УЩ образованы преимущественно в период 2,2–1,8 млрд лет. Дипирамидальный циркон на УЩ является докембрийским образованием, который отражает относительно узкий во времени палеопротерозойский этап истории УЩ. Такой циркон попадает в неогеновых и четвертичных терригенных отложениях юго-западной части УЩ, что может свидетельствовать о наличии на этой территории еще неизвестных палеопротерозойских источников щелочного магматизма. Дипирамидальные кристаллы циркона также могут принадлежать разным альбитизованным породам и пегматитам кислых и щелочных пород.

Ключевые слова: циркон, кристалломорфология, простые формы, морфологические типы, Украинский щит.

УДК 553.5:552.086:903.2

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.04>І. Нікітенко¹, канд. геол. наук, доц.,E-mail: ihornikitenko@gmail.com;О. Старік², канд. істор. наук,E-mail: segun.1@i.ua;М. Куцевол¹, канд. геол. наук, доц.,E-mail: m.kutsevol@gmail.com;¹Національний технічний університет "Дніпровська політехніка",
пр. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна;²Дніпропетровський національний історичний музей ім. Д.І. Яворницького,
пр. Д. Яворницького, 18, м. Дніпро, 49005, Україна

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕТРОГРАФІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНАХІДКИ КАМ'ЯНИХ ЛИВАРНИХ ФОРМ ДОБИ БРОНЗИ

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

Присвячено мінералого-петрографічному дослідженню сировини комплексу ливарних форм доби бронзи, знайденого експедицією Дніпропетровського національного історичного музею ім. Д.І. Яворницького під час розкопок пам'ятки археології Токієське-1, розташованої поблизу с. Токієське Апостолівського району Дніпропетровської області. Дослідження нового комплексу (скарбу) ливарних форм має велике значення, оскільки він може свідчити про появу нового потужного осередку бронзоливарного виробництва на території Подніпров'я. Визначення походження сировини ливарних форм може допомогти з'ясувати роль пам'ятки археології Токієське-1 у системі металообробних осередків сабати́нівського часу (XVI–XIII ст. до н. е.) та встановити її зв'язки зі стародавніми центрами видобутку кам'яної сировини. За матеріалами інших петрографічних досліджень відомо, що кам'яні ливарні форми вироблялися переважно з тальк-хлорит-тремолітових сланців, оскільки цей матеріал легко оброблявся та витримував більше відливки, ніж глиняні форми. Через це кам'яні матриці дуже цінувалися, як і бронзові вироби та зливки, і транспортувалися на значні відстані. Метою роботи було, на основі мінералого-петрографічного вивчення сировини ливарних форм встановити зв'язки пам'ятки археології Токієське-1 з гірничодобувними та металургійними центрами доби бронзи. У результаті дослідження зразків у прозорих шліфах, а також за допомогою рентгенофазового аналізу встановлено, що кам'яні ливарні форми були виготовлені з метамультрабазитів, переважно хлорит-антофілітового складу. Визначення походження гірських порід, з яких було виготовлено ливарні форми, проводилося шляхом порівняння їх мінералого-петрографічних особливостей з особливостями близьких за складом порід, що утворюють природні відслонення, описаних у звітах геологічної зйомки, літературних джерелах, а також тими, що спостерігалися нами у зразках гірських порід з природних відслонень Середнього Придніпров'я та Приазов'я. З'ясовано, що гірські породи, з яких було виготовлено всі ливарні форми колекції, не утворюють природних відслонень у Середньому Придніпров'ї та не є характерними для Криворіжжя, яке традиційно вважається основним центром з видобутку сировини для кам'яних ливарних форм доби пізньої бронзи на території України. Встановлено, що подібні породи більш характерні для Західного Приазов'я, однак не можна виключати й інше джерело надходження сировини комплексу ливарних форм, зокрема Південний Урал, де була значно розвинута металургія бронзи і використовувалися схожі кам'яні матриці. Отримані результати ставлять питання щодо перегляду сталих уявлень про джерела постачання кам'яної сировини за доби пізньої бронзи.

Ключові слова: петрографія, метамультрабазити, Український щит, ливарні форми, епоха бронзи.

Постановка проблеми. Мінералого-петрографічні методи на сьогодні широко застосовуються не лише при суто геологічних дослідженнях. Вони є важливим способом пізнання у багатьох інших галузях знань, однією з яких є археологія. Перші дослідження сировини кам'яних знарядь мінералого-петрографічними методами було виконано ще у XIX ст. відомим французьким мінералогом Огюстеном-Алексісом Дамуром. У нашій країні початок розвитку археологічної петрографії пов'язаний з ім'ям відомого фахівця у цій галузі – Віктора Федоровича Петруна. Особливо цінними є дані петрографічного аналізу для дослідження історії використання мінеральної сировини у найдавніші історичні періоди, про які писемні свідчення відсутні. На сьогодні за допомогою мінералого-петрографічних досліджень було з'ясовано безліч важливих фактів з історії стародавнього гірництва на території України: встановлено шляхи постачання кам'яної сировини та існування центрів з її видобутку, визначено особливості використання різних видів гірських порід від часу приходу перших людей до епохи середньовіччя.

Часом значного розвитку видобування та обмінної торгівлі кам'яною сировиною на території України була доба пізньої бронзи, а саме період існування у Північному Причорномор'ї сабати́нівської культури (XVI–XIII ст. до н. е.), що, перш за все, пов'язано з видобутком сировини для ливарних форм, які високо цінувалися стародавніми майстрами і поширювалися на значні відстані від місць видобутку. Знахідки комплексів (скарбів) ливарних форм того часу є важливими археологічними відкриттями, які дозволяють встановити нові факти про розвиток стародавньої металообробки та економіки в цілому. Дана стаття присвячена результатам мінералого-

петрографічного дослідження комплексу ливарних форм, знайдених поблизу с. Токієське Апостолівського району Дніпропетровської області.

У 2017 р., під час археологічних розкопок у с. Токієське, експедицією Дніпропетровського національного історичного музею ім. Д.І. Яворницького було виявлено комплекс ливарних форм для відливки бронзових виробів. Дана знахідка була приводом для переосмислення ролі пам'ятки археології доби бронзи Токієське-1, яка досліджувалася з 2012 р. і до цього розглядалася лише як мегалітичне культове місце з кам'яними закладками та жертвеником. Виявлення кам'яних знарядь та ливарних форм металургів дозволило поставити питання про знаходження на території пам'ятки стародавнього осередку металообробки. Важливим питанням, що постало перед дослідниками, стало визначення походження сировини ливарних форм, оскільки це могло вказати на зв'язок пам'ятки з певними металургійними і каменеобробними центрами, що існували за доби пізньої бронзи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Петрографічні дослідження сировини кам'яних ливарних форм у Північному Причорномор'ї мають давню історію. Ще понад 50 років тому В.Ф. Петрунем було проведено комплексне дослідження сировини всіх ливарних форм, виготовлених з "талькових сланців", що були знайдені в європейській частині колишнього СРСР, переважно на території України. Дослідження проводились у шліфах, а також за допомогою імерсійного методу. Вченим було визначено, що більшість порід, які слугували сировиною для виготовлення ливарних форм, належать до тальк-хлорит-тремолітових сланців. В.Ф. Петрунь вважав, що центром їх видобування було Криворіжжя, де талькові

сланці утворюють горизонт у товщі відкладів криворізької серії (Петрунь, 1967). У 1970-ті рр. скарб ливарних форм, знайдений при розкопках головурівської майстерні на Київщині, був досліджений І.М. Шарафутдіновою. У результаті було визначено, що матриці виготовлені з гірських порід хлорит-тальк-амфіболового ряду. Більшість ливарних форм було зроблено з тремолітиту, який включає різну кількість тальку і хлориту та має вміст тремоліту від 50 до 90 %. У двох зразках у мінеральному складі порід переважає тальк: одна матриця була виготовлена з тремоліт-талькової породи (вміст тальку – 95 %), а інша – з хлорит-талькового сланцю (тальку – 60 %) (Шарафутдінова, 1973). У 1980-ті рр. І.М. Шарафутдінова вивчила перший скарб ливарних форм і заготовок, виявлений на території Кривбасу, який на той час традиційно вважався центром з видобутку талькових сланців, що слугували сировиною для таких виробів. Матриці і заготовки було знайдено у 1975 р. на лівому березі р. Інгулець, поблизу с. Новоселівка Широківського району Дніпропетровської області. Петрографічне дослідження проводилося петрографом Н.К. Воронкевичем та геологом А.Т. Батуриною, якими було здійснено аналіз усіх 15 виробів скарбу. Їх матеріал було визначено як хлорит-тальк-тремолітовий сланець. Мінеральний склад зразків: тальк (15–20 %), хлорит (10–30 %), тремоліт (50–70 %). За висновками дослідників, сировина всіх виробів походить з одного родовища. І.М. Шарафутдінова розглядала Криворіжжя як основний центр постачання сировини для ливарних форм, однак припускала також існування інших місць видобутку подібних до описаних вище гірських порід, зокрема, на р. Мокра Сура або поблизу с. Вовниги у Надпоріжжі. (Шарафутдінова, 1985). Дослідження сировини ливарних форм продовжились на початку нинішнього століття. Так, знайдені на поселенні Широка Балка-2 у Північно-Східному Приазов'ї уламки матриць для відливки кельту та спису були, за висновком В.М. Горбова та О.М. Смирнової, виготовлені з метаультрабазитів подніпровського походження (Горбов та Смирнова, 2005). Дослідження сировини ливарних форм, знайдених на території Картаміського археологічного мікрорайону Донецького гірничо-металургійного центру доби пізньої бронзи, проводились І.С. Нікітенком. Було встановлено, що всі вони виготовлені з тальк-хлоритових сланців майже однакового складу і зроблено висновок про найбільш вірогідне криворізьке походження сировини ливарних форм (Нікітенко, 2010). Думка про криворізьке походження більшості ливарних форм на сьогодні лишається домінуючою. Так, В.С. Бочкарьов наголошує на тому, що тальковий сланець був доволі дефіцитним матеріалом, який у вигляді брусків вивозився з Криворіжжя до Середнього Подніпров'я і Приазов'я (Бочкарьов, 2010).

Окрім публікацій петрографічних досліджень, існує низка археологічних статей, які теж містять визначення сировини ливарних матриць доби пізньої бронзи. Наприклад, Я.П. Гершкович зі співавторами, на основі дослідження матриць з новокиївської майстерні (Херсонська обл.), роблять висновок, що вони "виготовлені з брусків талькового сланцю, прояви якого в наш час відомі у відслоненнях поблизу с. Павлівка Сурського р-ну (? – Авт.) Дніпропетровської обл." (Гершкович та ін., 1987а). Ще одна матриця з Херсонщини зі слюдистого сланцю, на думку вчених, походить з родовищ у Дніпропетровській області та у Приазов'ї (Гершкович та ін., 1987б). Ливарна форма для виробництва прикрас, випадково знайдена поблизу с. Андріївка Волноваського р-ну Донецької обл., була визначена А.В. Курбаном як зроблена з аргіліту (Курбан, 1995).

Центри металлообработки Північного Причорномор'я, на думку Н. Сави та Е. Бороффки, за доби пізньої бронзи відігравали важливу роль, поєднуючи металургійні осередки Балкан з приуральськими та кавказькими (Сава

та Бороффка, 2013). Ще О.М. Лесков вказував на значущість географічного розташування Південної України "між територіями металургійних центрів Кавказу, Поволжя, Уралу, Сибіру, Балкано-Егейського світу і Центральної Європи" (Лесков, 1967). Враховуючи таке географічне положення, Середнє Придніпров'я могло бути кінцевою територією для доставки сировини. За підрахунками В.С. Бочкарьова, сировина за сабатинівських часів могла транспортуватись на середню відстань 400–600 км. (Бочкарьов, 2010). Зокрема, на цій відстані від Токівського-1 знаходився потужний Донецький гірничо-металургійний центр доби бронзи (Brovender and Okalelov, 2019), з яким міг проводитись обмін металом та сировиною для ливарних форм.

Отже, на сьогодні встановлено, що переважна більшість кам'яних ливарних форм доби пізньої бронзи виготовлялася з метаультрабазитів. Більшість дослідників вважають, що видобуток цих гірських порід проводився у Середньому Придніпров'ї, зокрема на Криворіжжі, звідки готові форми або заготовки поширювалися по всій степовій та лісостеповій зонах.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Ливарні форми доби бронзи з пам'ятки археології Токівське-1 мінералого-петрографічними методами дотепер не досліджувались. При цьому петрографічному вивченню були піддані всі інші типи кам'яних знарядь та елементів конструкцій, знайдені під час археологічних розкопок пам'ятки (Nikitenko et al., 2018; 2019). Таким чином, без дослідження сировини кам'яних ливарних форм вивченість матеріалів розкопок комплексу є неповною. Проведення такого дослідження дозволить визначити місце пам'ятки в системі постачання заготовок та готових ливарних форм доби пізньої бронзи, а також надасть додаткову інформацію для визначення ролі Токівського-1 як металлообробного осередку племен доби пізньої бронзи Північного Причорномор'я.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою роботи є, на основі результатів мінералого-петрографічного вивчення сировини ливарних форм, встановити зв'язки пам'ятки археології Токівське-1 з гірничодобувними та металургійними центрами доби бронзи. Для виконання мети було необхідно провести дослідження сировини ливарних форм та порівняти отримані результати з геологічними даними, які містяться в матеріалах первинної геологічної зйомки та опублікованих працях. Також було потрібно порівняти сировину ливарних форм у шліфах зі зразками метаультрабазитів з відслонень Середнього Придніпров'я та Приазов'я, відібраними одним з авторів.

Виклад основного матеріалу дослідження. У результаті дослідження сировини колекції з п'яти ливарних форм у шліфах було встановлено, що одна з них є керамічною, а чотири виготовлені з близьких за мінеральним складом метаморфічних гірських порід. Кам'яні матриці мають інвентарні номери: 195, 380, 381 та 382 (рис. 1). Породи, з яких було виготовлено ливарні форми, можна визначити як метаультрабазити. Їх головними мінералами є антофіліт і хлорит. Другорядними мінералами виступають тальк і тремоліт, останній з яких відсутній у зразку 195, а його найбільший вміст спостерігається у зразку 382. Також у всіх зразках міститься до 2 % гетиту і рудного мінералу. Виходячи з того, що досліджувані гірські породи мають лінійну текстуру, їх можна визначити як сланці хлорит-антофілітові, що містять різну кількість тальку і тремоліту.

Для більш точного визначення мінерального складу ливарних форм було проведено рентгенофазовий аналіз зразків 195, 380 і 381 (рис. 2). Форма 382 за допомогою

рентгенофазового аналізу не досліджувалась через неможливість відбору додаткового матеріалу з цінного артефакту. Аналіз проводився на дифрактометрі ДРОН-2 у лабораторії кристалохімії та структурного аналізу Інституту геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семеника НАН України, аналітик канд. геол. наук, ст. наук співроб. О.Є. Гречановська. За результатами дослідження встановлено, що у всіх зразках присутні: антофіліт, мінерал

групи хлоритів – клінохлор, а також тальк. Найбільший вміст тальку, за даними рентгенівського дослідження, зафіксовано у зразку 380, де за інтенсивністю окремих максимумів він не поступається хлориту. Наявність інтенсивного рефлексу 3,07 (003) у зразку 381 може вказувати на можливість присутності пірофіліту, але у досліджуваному шліфі цей мінерал ідентифіковано не було.



Рис. 1. Кам'яні ливарні форми з пам'ятки археології Токівське-1

У всіх досліджених шліфах, виготовлених із сировини ливарних форм, *антофіліт* спостерігається у вигляді голчастих і стовпчастих кристалів, орієнтованих лінійно або зібраних у пучки (рис. 3). Мінерал безбарвний, але на деяких ділянках забарвлений у коричневий колір внаслідок розвитку по ньому гетиту. Антофіліт діагностований за формою кристалів, кольором, характером спайності, показниками заломлення та силою двозаломлення, а також прямим згасанням у всіх розрізах. Поряд із цим ромбічним амфіболом у всіх шліфах, крім зразка 195, був визначений моноклінний амфібол – *тремоліт*. Хоча останній мінерал має дуже подібні оптичні константи та аналогічні антофіліту форми виділення, він відрізняється косим згасанням, що не є характерним для ромбічних амфіболів (Дир та ін., 1965). Кут згасання кристалів тремоліту у вивчених шліфах завжди перевищував 11° . Відомо, що у випадку орієнтації площини шліфа паралельно (010), тремоліт також може мати пряме згасання (Лодочников, 1974). Також проблематичним є визначення мінерального виду амфіболу при поперечному зрізі голчастих кристалів. Проте, виходячи з того, що тремоліт не було зафіксовано в результаті рентгенофазового аналізу, можна зробити висновок, що у зразках 380 та 381 він міститься у кількості перших процентів. Іншою є ситуація зі зразком 382, у якому антофіліт і тремоліт утворюють суттєво відмінні за розміром індивіди. Так, в основній масі, складеній стовпчастими кристалами тремоліту та мікролускуватим хлоритом, спостерігаються крупніші кристали (порфіробласти) антофіліту стовпчастої форми, що не мають певного орієнтування (рис. 4). Всі порфіробласти мають пряме згасання і віднесені нами до антофіліту. Припускаємо, що у разі належності частини кристалів до тремоліту, не

всі б із них могли бути розташовані площиною другого пінакоїду паралельно площині шліфа. Таким чином, гірська порода, з якої було виготовлено ливарну форму 382, можна визначити як сланець тремоліт-хлорит-антофілітовий, тальквмісний. *Хлорит* у всіх зразках утворює агрегат мікрозернистих лусок, орієнтованих у тому ж напрямку, що й основна маса кристалів амфіболу, має пряме, у деяких випадках хвилясте згасання. У порівнянні з амфіболами і тальком, мінерал виділяється низькими кольорами інтерференції при схрещених ніколях. *Тальк* представлений лусками й лускуватими агрегатами, безбарвними в прохідному світлі, що мають високе двозаломлення та достатньо досконалу спайність. *Рудний мінерал* спостерігається у вигляді видовжених, еліпсоїдальних та ізометричних зерен чорного кольору, орієнтованих згідно зі сланцюватістю. *Гетит* утворює крипнокристалічні агрегати, розвинені по породотвірним мінералам. У зразку 382 відмічене одичинне зерно мінералу з низьким двозаломленням, досконалою спайністю та включеннями дрібніших зерен інших мінералів. Найвірогідніше, це мінерал групи серпентину. Текстура зразків 195, 380 і 381 сланцювата (лінійна), структура гетеролепідонематобластова, мікро-дрібнозерниста. Гірська порода зразка 382 має масивну текстуру, порфіробластову структуру з гетеролепідонематобластовою структурою основної маси.

Походження сировини ливарних форм. Головною спільною рисою матеріалу досліджених ливарних форм є присутність у мінеральному складі значної кількості антофіліту, який відіграє роль одного з головних мінералів. На відміну від істотно тремолітових сланців, антофілітові породи ніколи не визначалися як сировина для виготовлення ливарних форм на території Північного Причорномор'я.

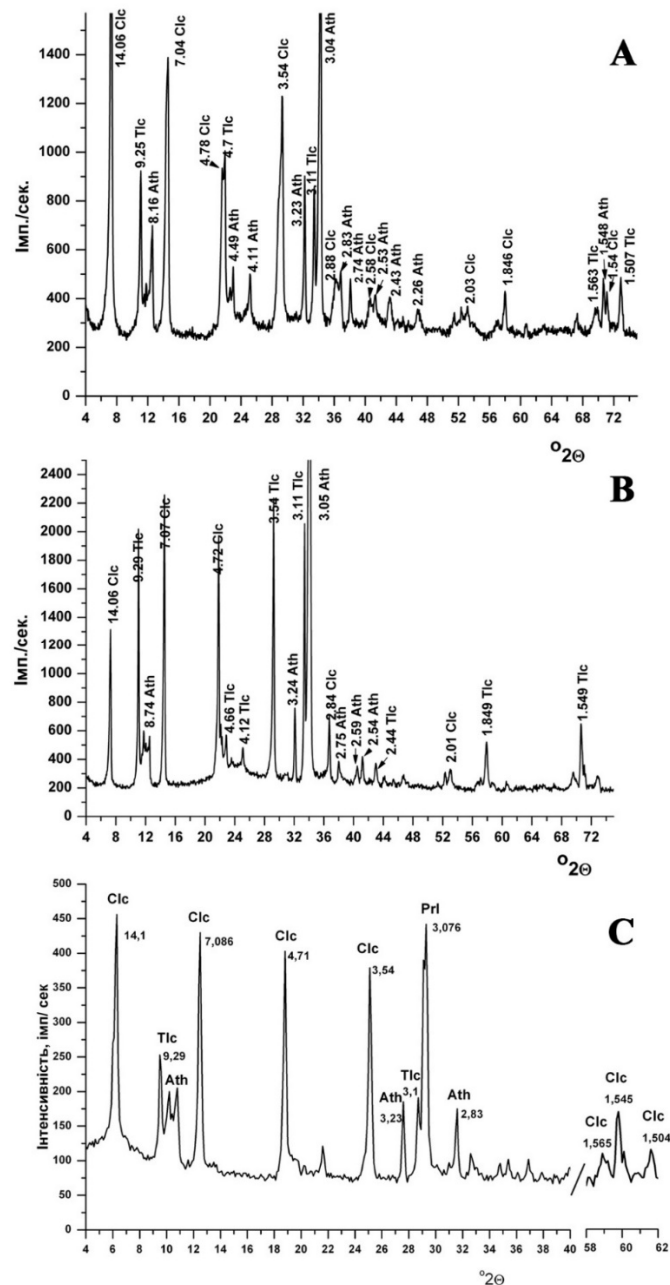


Рис. 2. Рентгенівські дифрактограми зразків 195 (А), 380 (В) та 381 (С).
Clc – клінохлор, Ath – антофіліт, Tlc – тальк, Prl – пірофіліт

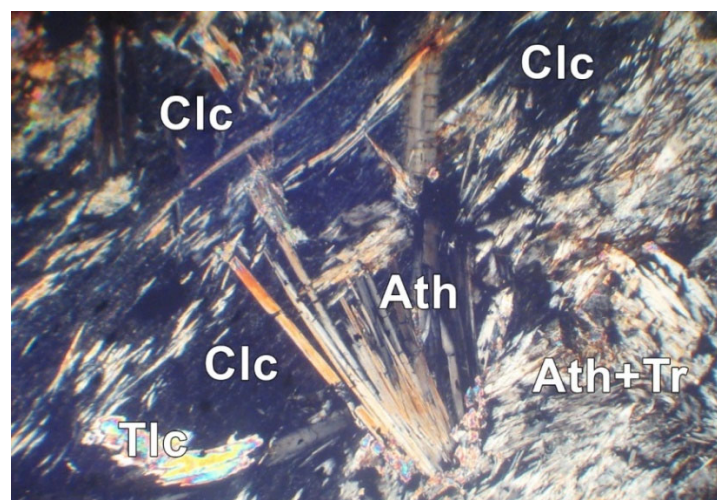


Рис. 3. Сланець хлорит-антофілітовий з тальком і тремолітом (зразок 380).
Ath – антофіліт, Clc – клінохлор, Tr – тремоліт, Tlc – тальк. Світло прохідне, ніколі схрещені, збільш. 47 $\times$

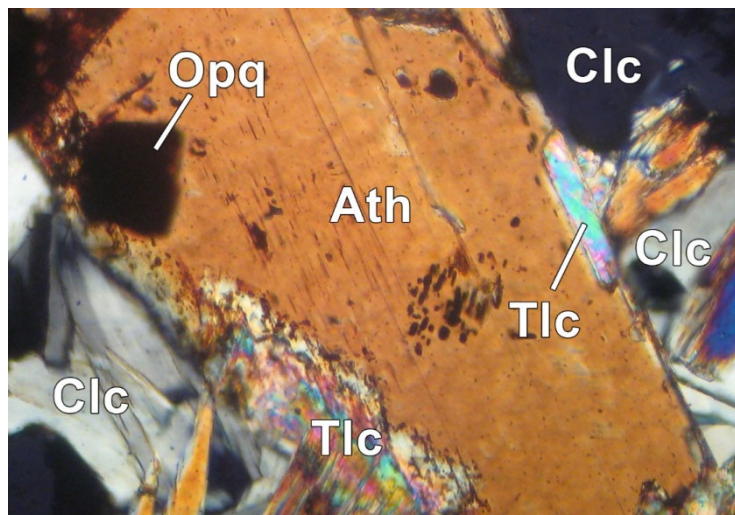


Рис. 4. Сланець тремоліт-хлорит-антофілітовий з тальком (зразок 382).

Ath – антофіліт, Clc – клінохлор, Tlc – тальк, Orq – рудний мінерал. Світло прохідне, ніколи схрещені, збільш. 210 $\times$

Антофілітовмісні метаультрабазити зустрічаються у складі зеленокам'яних структур Українського щита (УЩ). Антофіліт є менш поширеним мінералом, ніж тремоліт й актиноліт, і лише кілька ділянок могли бути потенційним джерелом надходження сировини для виготовлення досліджених ливарних форм. Значні тіла антофілітових гірських порід відзначалися В.В. Байраковим у Західному Приазов'ї на Осипенківській, Куйбишевській і Петровській ділянках та у Середньому Придніпров'ї у складі Петрівського і Правдинського масивів, а також по р. Мокра Московка. Максимальний розмір тіл у Західному Приазов'ї (Осипенківська ділянка) становить 30 x 550 м, а у Середньому Придніпров'ї (Петрівський масив) – 150 x 600 м. (Байраков, 1975).

Важливою умовою для використання гірських порід як кам'яної сировини у давнині, яку треба враховувати при визначенні походження матеріалу кам'яних артефактів, є наявність природних відслонень, оскільки стародавні гірники могли проводити розробку корисних копалин лише близько до поверхні. Оскільки геологічні дослідження останніх півстоліття переважно базуються на даних буріння, в нагоді можуть стати праці середини ХХ ст., у яких дається опис відслонень. У даному випадку цінними працями є дослідження метабазитів та метаультрабазитів І.С. Усенка (Усенко, 1953), а також звіти з геологічної зйомки, у яких представлено описи відслонень гірських порід (А.Г. Виногородський, 1960; А.А. Зайцев, 1968; В.Ф. Киктенко, 1968; М.В. Кушинов, 1983; А.В. Тимошенко, 1962). Відносно поширеності різних мінералів у складі порід певних структур, вичерпну інформацію представлено у монографіях за редакцією акад. Є.К. Лазаренка: "Мінералогія Криворізького басейну" та "Мінералогія Приазов'я" (Лазаренко *и др.*, 1977, 1981).

За даними зйомки А.Г. Виногородського, який виконував геологічні дослідження на площі проведення археологічних розкопок (листи L-36-8В та Г, L-36-20-А, Б, В і Г), ультраосновні породи не зустрічаються серед калішпатових гранітів токівського комплексу, а залягають серед амфіболітів і плагіогранітів. З цього випливає, що відслонення метаультрабазитів безпосередньо поблизу пам'ятки Токівське-1 знаходитись не могли. Найближчі до місця знахідки скарбу ливарних форм відслонення даних порід знаходяться на північ від с. Токівське по р. Базавлучок, де вони залягають у формі дайок. Усього було відмічено чотири відслонення. Також жили тремолітових та актиноліт-тремолітових порід відмічалися по р. Базавлук. Всі дайки мають закономірну зональну бу-

дову. У центральній частині розвинуті актиноліт-тремолітові породи, по периферії їх змінюють хлорит-тремолітові породи, а на контактах дайок із вмісними породами присутній шар мономінеральної хлоритової породи. Мінеральний склад ультрабазитів: актиноліт, тремоліт, хлорит, рудні мінерали. Узагальнений склад актиноліт-тремолітових порід з усіх інших проявів досліджуваної площі є таким: актиноліт (0 – 95%), тремоліт (0–95 %), тальк (0–40 %), хлорит (0–53 %), антигорит (0–5 %), біотит (0–5 %), карбонати (0–10 %), кварц (0–35 %), плагіоклаз (0–2 %), сфен, пірит, магнетит (0–3 %). Нині згадані відслонення істотно змінені гіпергенними процесами і представлені переважно пухкими продуктами вивітрювання. На сьогодні відслонення по річках Базавлучок та Базавлук є єдиними, що збереглися на даній території.

У роботі І.С. Усенка антофілітовмісні метаультрабазити, що також містять тремоліт, тальк і рудні мінерали, відмічаються у Приазов'ї по р. Обитичній. У Середньому Придніпров'ї дослідником відзначаються лише тремолітові сланці різного складу по річках Чортомлик та Солоній, наявність антофіліту в яких не згадується (Усенко, 1953).

Під час дообслідування Чортомлицької структури, що проводилося під керівництвом М.В. Кушинова на початку 1980-х, через неї було пробурено кілька профілів. Серед виявлених метаультрабазитів були відмічені хлорит-актинолітові, тальк-тремолітові, тремоліт-хлоритові сланці, а також тремолітові й актинолітові породи. Мінеральний склад порід: актиноліт, тремоліт, хлорит, тальк, карбонат, епідот, плагіоклаз, магнетит, турмалін, ільменіт, рутил, лейкоксен, сфен, гранат, апатит, циркон, целестин, корунд, бадделеїт, муасоніт, піротин, халькопірит, галеніт, сфалерит, молібденіт, вісмутин, шееліт. Тобто у складі метаультрабазитів структури наявність антофіліту не було зафіксовано.

Згадані вище найбільш перспективні на антофіліт у Середньому Придніпров'ї Петрівський і Правдинський масиви належать до Сурської структури Середньопридніпровського мегаблоку УЩ. За даними геологічної зйомки природних відслонень у басейні р. Сура, що проводилася у 1968 р. під керівництвом А.А. Зайцева, серед метаультрабазитів відслонюються переважно талькові сланці, що містять хлорит, карбонат і незначний домішок амфіболу. Лише на одному відслоненні, розташованому у б. Редіна, на поверхню виходять істотно амфіболітові сланці тальк-хлорит-актинолітового складу. Тремолітити, досліджені О.О. Зайцевим у районі течії р. Мокра Сура, не містять антофіліту, а мають у складі тільки тальк і гіперстен, іноді переходять у тальк-тремолітову породу. Лише частина

висновків у звіті зроблена за даними вивчення гірських порід з природних відслонень, більшість складають матеріали досліджень керну свердловин.

Таким чином, станом на кінець 1960-х років, антофілітовмісні породи не були виявлені у зоні найбільш перспективних на цей мінерал зеленокам'яних структур у Середньому Придніпров'ї, зокрема, у результаті геологічної зйомки не були відмічені відслонення антофілітовмісних метавулканичних порід до яких належить сировина досліджених ливарних форм. Це може означати, що антофілітові гірські породи даного регіону залягають на значних глибинах, які були недоступні стародавнім гірникам.

Єдиним свідченням наявності у Середньому Придніпров'ї антофілітовмісних порід, що залягають близько до денної поверхні, є дані В.Ф. Киктенка, яким відмічається тіло ультрабазитів, виявлене на правому березі р. Мокра Московка у Передаточнянському кар'єрі у м. Запоріжжя. Геологічне тіло приурочене до контакту гранітів й амфіболітів. До його складу входять перидотит, серпентиніт, тальк-актинолітова порода, тремоліт, актиноліт. Антофіліт міститься у тальк-антофілітовій породі, яка складає центральну частину тіла. Мінеральний склад цієї породи: антофіліт (60–90 %), тальк (10–40 %), магнетит (1–5 %), зрідка серпентин (1–3 %).

Важливим фактом є те, що сировина досліджених ливарних форм не має аналогів серед гірських порід, поширених у Криворізькому басейні. Антофіліт тут є дуже рідкісним мінералом і перебуває в асоціації з роговою обманкою, піроксеном, біотитом, кумінгтонітом, плагіоклазом, епідотом, гранатом і зрідка кордієритом (*Лазаренко і др., 1977*). Відповідно, на Криворіжжі відсутні породи, у яких антофіліт асоціює із хлоритом, тальком і тремолітом, як у дослідженій сировині ливарних форм.

Матеріал досліджених ливарних форм було порівняно у шліфах з колекцією порід талькового горизонту, відібраних із природних відслонень Кривбасу, а також із матеріалом ливарних форм, знайдених у Середньому Придніпров'ї та на Донбасі, включаючи досліджений І.М. Шарафутдіновим скарб ливарних форм із південного Криворіжжя. У результаті порівняння, гірських порід, подібних сировині досліджуваних ливарних форм, виявлено не було. Єдиним свідченням на користь існування у давнині відслонень антофілітовмісних порід у Середньому Придніпров'ї є дослідження одного з авторів даної статті, яке стосувалося сировини неолітичних "човника" та посудини, знайдених у Надпоріжжі. Названі вироби були виготовлені з тремоліт-талькових порід різного ступеня змінності. У складі менш зміненого метавулканифіту – сировини човника – разом із тремолітом був наявний антофіліт (*Нікітенко, 2012*).

У Приазов'ї антофілітовмісні гірські породи, зокрема хлорит-тремоліт-антофілітові породи, проявлені у багатьох місцях (*Лазаренко і др., 1981*). Так, поблизу с. Андріївка, у яру, що починається від Кам'яної Могили (поряд з горою Зеленою), відслонюється смуга ультрабазитів потужністю 8 м, яка простежується за простяганням на 30 м. Вона складена амфіболізованим перидотитом, у якому амфібол представлений антофілітом. Структура породи сплутано-волокниста, завдяки чому вона має високу в'язкість. Незначні відслонення, подібні до описаного біля с. Андріївка, розташовані по річках Сухій та Мокрій Конці, в б. Крутий, що впадає нижче смт Більмак у р. Кам'янку. Метавулканифіти представлені амфіболізованими піроксенітами, частково хлоритовими, тремоліт-актинолітовими та антофілітовими породами. Поблизу с. Єлисейка відслонюються повністю перекристалізовані ультрабазити, що містять антофіліт, який розвивається по поверхні крупних кристалів актиноліту або уздовж тріщин спайності останніх.

І.С. Усенко дану породу визначав як хлоритовий антофіліт-актиноліт, що утворився в результаті перетворення не піроксенітів, а перидотитів (Усенко, 1953). Також нами було проведено польове обстеження відслонень метавулканифітів Осипенківської ділянки Сорочинської зеленокам'яної структури у районі Бердянського водосховища. Зокрема, було відібрано зразок хлорит-тремолітової породи, що містить і тальк і незначну кількість антофіліту.

Висновки. У результаті дослідження сировини колекції ливарних форм, знайдених поблизу с. Токівське, визначено, що їх було виготовлено з гірської породи, яка раніше не фіксувалася при вивченні матеріалу подібних виробів доби пізньої бронзи у Північному Причорномор'ї – хлорит-антофілітової сланцю, що містить тремоліт і тальк. Попри сталу думку про видобуток сировини для більшості ливарних форм представниками сабатинівської культури на території Криворізького басейну та незважаючи на близькість місця знахідки скарбу до Кривбасу, матеріал досліджених ливарних форм, скоріш за все, походить з іншого місця. Подібні антофілітові метавулканифіти поширені на УЩ у складі зеленокам'яних структур та у вигляді дайкових тіл, що січуть гранітоїди як на території Середнього Придніпров'я, де було знайдено артефакти, так і у Приазов'ї. Однак сьогодні подібні породи виходять на поверхню лише у Приазов'ї. У Середньому Придніпров'ї вони були виявлені на значних глибинах лише у результаті буріння свердловин. Єдине відслонення антофілітовмісних метавулканифітів у Середньому Придніпров'ї розташоване у Надпоріжжі по р. Мокра Московка – лівій притоці Дніпра, однак ця гірська порода відрізняється від сировини вивчених артефактів за мінеральним складом.

Виходячи з вищевикладеного, можна констатувати, що сировина досліджених ливарних форм була привезена з іншої території, ніж район проведення розкопок. Антофілітові метавулканифіти мають велику вірогідність походження з території Приазов'я, де зафіксовані відслонення подібних гірських порід. Це ставить питання про існування Приазовського центру видобутку сировини для виготовлення ливарних матриць, що передбачає визначення місць провадження розробки та окреслення відмін метавулканифітів, що видобувалися саме у цьому регіоні. Також не можна виключати можливість привезення даних порід з віддалених територій, зокрема з Південного Уралу, де була значно розвинута металургія бронзи і використовувалися схожі кам'яні ливарні форми.

Отримані дані вказують на те, що мережа центрів з видобутку, а також шляхів постачання сировини для виготовлення ливарних форм доби пізньої бронзи була більш складною, ніж її прийнято вважати, і потребує подальшого дослідження із застосуванням мінералого-петрографічних методів.

Автори висловлюють щире вдячність за цінні консультації В.І. Ганочко, О.Є. Гречановській, Є.С. Перкову, В.В. Сукачу та В.О. Шпильчаку.

Список використаних джерел

- Байраков, В.В. (1975). Особливості поширення і склад антофілітовмісних порід Українського кристалічного масиву. *Доповіді академії наук Української РСР. Серія Б. Геологія, геофізика, хімія та біологія*, 10, 867–871.
- Бочкарев, В.С. (2010). Культурогенез і древнее металлопроизводство Восточной Европы. СПб: "Инфо Ол".
- Гершкович, Я.П., Ключко, В.И., Евдокимов, Г.Л. (1987а). Новокиевская литейная мастерская и проблемы хронологии сабатиновских памятников Нижнего Поднепровья. *Советская археология*, 2, 142–159.
- Гершкович, Я.П., Ключко, В.И., Оленковский, Н.П. (1987б). Литейная форма эпохи поздней бронзы из Нижнего Поднепровья. *Советская археология*, 3, 211–213.
- Горбов, В.Н., Смирнова, О.М. (2005). Палеоконтакты населения позднего бронзового века Северо-Восточного Приазовья (по данным минералогического анализа каменных орудий труда). *Древности 2005. Харьковский историко-археологический ежегодник*, 6, 87–96.

Дир, У.А., Хауи, Р.А., Зусман, Дж. (1965). Пороодообразующие минералы. Т. 2: Цепочные силикаты (Пер. с англ. Ю.К. Андреева и др.; под ред. и с предисл. В.П. Петрова). Москва: Мир.

Курбан, А.В. (1995). Ливарна формочка з Приазов'я доби пізньої бронзи. *Археологія*, 2, 130–131.

Лазаренко, Е.К., Гершойг, Ю.Г., Бучинская, Н.И. и др. (1977). Минералогия Криворожского бассейна. Киев: Наукова думка.

Лазаренко, Е.К., Лавриненко, Л.Ф., Бучинская, Н.И. и др. (1981). Минералогия Приазовья. Киев: Наукова думка.

Лесков, А.М. (1967). О северопричерноморском очаге металлообработки в эпоху поздней бронзы. Памятники эпохи бронзы юга европейской части СССР. Киев: Наук. думка, 143–178.

Лодочников, В.Н. (1974). Главнейшие породообразующие минералы. Издание 5-е испр. и доп. Под ред. В.С. Соболева. Москва: Недра.

Нікітенко, І.С. (2010). Про матеріал кам'яних знарядь Картамиського археологічного мікрорайону епохи бронзи, виготовлених із привізної сировини. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 9–10, 5–9.

Нікітенко, І.С. (2012). Про сировину талькових виробів доби неоліту з Дніпровського Надпоріжжя. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, 5, 12–17.

Петрунь, В.Ф. (1967). Петрография и некоторые проблемы материала каменных литейных форм эпохи поздней бронзы из Северного Причерноморья. Памятники эпохи бронзы юга Европейской части СССР. Киев: Наукова думка, 185–194.

Сава, Е., Бороффка, Н. (2013). Новые находки бронзовых предметов эпохи поздней бронзы в Пруто-Днестровском междуречье. *Revista Arheologică*, IX, 1, 166–187.

Усенко, І.С. (1953). Архейские матабазиты и ультрабазиты Украинского кристаллического массива. Киев: Изд-во АН УССР.

Шарафутдінова, І.М. (1973). Бронзоліварна майстерня з с. Головурів на Київщині. *Археологія*, 12, 61–70.

Шарафутдінова, І.М. (1985). Про виготовлення ливарних форм епохи бронзи в Північному Причорномор'ї. *Археологія*, 49, 63–75.

Brovender, Yu. M., Okalelov, V. N. (2019). On extraction of ore minerals of the Donetsk basin in the Early Metal Age. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 13–20. DOI: 10.29202/nvngu/2019-1/2

Nikitenko, I.S., Starik, O.V., Kutsevol, M.L., Shevchenko, S.V. (2018). Petrographic research on stone tools from the megalithic cult site of Tokivske-1. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 5–12. DOI: 10.29202/nvngu/2018-4/1

Nikitenko, I.S., Starik, O.V., Marchenko, V.A. (2019). Results of petrographic research of new finds from the archaeological monument Tokivske-1. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28, 3, 519–527. DOI: 10.15421/111948

References

Bairakov, V.V. (1975). Features of the distribution and composition of anthophyllite-containing rocks of the Ukrainian crystalline massif. *Reports NAS of Ukraine. Series B. Geology, Geophysics, Chemistry and Biology*, 10, 867–871. [in Ukrainian]

Bochkaryov, V.S. (2010). Cultural genesis and ancient metal production in Eastern Europe. St. Petersburg: Info Ol. [in Russian]

Brovender, Yu. M., Okalelov, V. N. (2019). On extraction of ore minerals of the Donetsk basin in the Early Metal Age. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1, 13–20. DOI: 10.29202/nvngu/2019-1/2

Gershkovich, Ya. P., Klochko, V.I., Yevdokimov, G.L. (1987). Novokievskaya casting workshop and problems of chronology of Sabatinovskaya monuments of the Lower Dnieper area. *Soviet Archaeology*, 2, 142–159. [in Russian]

Gershkovich, Ya. P., Klochko, V.I., Olenkovskiy, N.P. (1987). Late Bronze Age casting mold from the Lower Dnieper area. *Soviet Archaeology*, 3, 211–213. [in Russian]

Gorbov, V.N., Smirnova, O.M. Paleocontacts of the Late Bronze Age population of the Northeast Azov Region (by the data of stone tools mineralogical analysis). *Drevnosti (antiquities) 2005. Kharkiv historical and archaeological annual*, 6, 87–96. [in Russian]

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. (1965). Rock-Forming Minerals. Vol. 2. Chain Silicates. (Transl. from Eng. by Yu.K. Andreeva et al.; Edited by V.P. Petrov). Moscow: Mir. [in Russian]

Kurban, A.V. (1995). Late Bronze age casting mold from the Azov Sea area. *Archaeology*, 2, 130–131. [in Ukrainian]

Lazarenko, Ye.K., Gershoyg, Yu.G., Buchinskaya, N.I. et al. (1977). Mineralogy of Kryvoy Rog basin. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Lazarenko, Ye.K., Lavrynenko, L.F., Buchinskaya, N.I. et al. (1981). Mineralogy of the Azov sea area. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Leskov, A.M. (1967). On the North Black Sea centre of metal processing in the Bronze Age. Bronze Age monuments of the South of the European part of USSR. Kyiv: Naukova dumka, 143–178. [in Russian]

Lodochnikov, V.N. (1974). Main rock-forming minerals. 5th Edition, corrected and supplemented. Edited by V.S. Sobolev. Moscow: Nedra.

Nikitenko, I.S. (2010). About the material of stone tools from Kartamysh archaeological microdistrict of the bronze age made of imported raw materials. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 9–10, 5–9. [in Ukrainian]

Nikitenko, I.S. (2012). Raw materials used for production of talc ware in the Neolithic Age at the area near Dniepr rapids. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 12–17. [in Ukrainian]

Nikitenko, I.S., Starik, O.V., Kutsevol, M.L., Shevchenko, S.V. (2018). Petrographic research on stone tools from the megalithic cult site of Tokivske-1. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 5–12. DOI: 10.29202/nvngu/2018-4/1

Nikitenko, I.S., Starik, O.V., Marchenko, V.A. (2019). Results of petrographic research of new finds from the archaeological monument Tokivske-1. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28, 3, 519–527. DOI: 10.15421/111948

Petrin, V.F. (1967). Petrography and some problems of the material of stone casting molds of the Late Bronze Age from the Northern Black Sea area. Bronze Age monuments of the South of the European part of USSR. Kyiv: Naukova dumka, 185–194. [in Russian]

Sava, E., Boroffka, N. (2013). New finds of bronze objects of the Late Bronze Age in the Prut-Dniester interfluvium. *Revista Arheologică*, IX, 1, 166–187. [in Russian]

Sharafutdinova, I.M. (1973). Bronze workshop from the village Holovuriv in Kyiv region. *Archaeology*, 12, 61–70. [in Ukrainian]

Sharafutdinova, I.M. (1985). On the production of the Bronze Age casting molds in the Northern Black Sea area. *Archaeology*, 49, 63–75. [in Ukrainian]

Usenko, I.S. (1953). Archaean matabasites and ultrabasites of the Ukrainian crystalline massif. Kyiv: Edition of the Academy of Science of UkrSSR. [in Russian]

Надійшла до редколегії 19.11.19

I. Nikitenko¹, Cand. Sci (Geol.), Assoc. Prof.

E-mail: ihornikitenko@gmail.com;

O. Starik², Cand. Sci (Hist.)

E-mail: segun.1@i.ua;

M. Kutsevol¹, Cand. Sci (Geol.), Assoc. Prof.,

E-mail: m.kutsevol@gmail.com;

¹Dnipro University of Technology,

19 D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine;

²Dnipropetrovsk National Historical Museum named after D.I. Yavornytskyi,

18 D. Yavornytskyi Ave., Dnipro, 49005, Ukraine

RESULTS OF A PETROGRAPHIC STUDY OF THE BRONZE AGE CASTING MOLDS FINDS

The present article is devoted to the mineralogical and petrographic research of raw materials of the collection of casting molds of the Bronze Age, found by the expedition of Dnipropetrovsk National Historical Museum named after D.I. Yavornytskyi during the excavations of the archaeological monument of Tokivske-1, located near the village Tokivske of Apostolove Rayon, Dnipropetrovsk Oblast. The finding of casting molds is of great importance, since it can be the evidence of bronze foundry production existence in the territory of the monument, which until now was regarded only as a megalithic place of worship. Provenance determination of the raw materials of casting molds can help to identify the role of Tokivske-1 in the system of metalworking cells of the Sabatinivska culture time (XVI–XIII centuries BC) and to establish its links with the ancient centers of mining of stone raw materials. According to previous petrographic studies, it is known that stone molds were made mainly of talc-chlorite-tremolite schists, since this material was easily processed and could withstand more castings than clay molds. Because of this, stone casting molds were highly valued, as well as bronze wares and ingots, and were transported over long distances. The purpose of the study was to establish links between the archaeological monument of Tokivske-1 and known mining and metallurgical centers of the Bronze Age, on the basis of mineralogical and petrographic research of raw materials of casting molds. As a result of the study of samples in thin sections and by X-ray diffraction analysis, it was established that the stone molds were mainly made of tremolite-chlorite-anthophyllite meta-ultrabazites. The determination of the origin of the rocks from which the casting molds were made was carried out by comparing their mineralogical and petrographic features with the features of similar rocks that form natural outcrops, as described in geological survey reports and literary data, and as observed by us in rock samples from natural outcrops in the Middle Dnipro and the Azov Sea areas. It was ascertained that the rocks from which all the casting molds of the collection were made do not form natural outcrops in the Middle Dnipro area and are not characteristic of the Kryvyi Rih area, which is considered to be the main center of

raw materials extraction for the stone foundry forms of the Late Bronze Age on the territory of Ukraine. It was established that such rocks are more characteristic of the Western Azov Sea area, but one can not exclude another source of raw materials of the mold collection, in particular the Southern Urals, where bronze metallurgy was significantly developed and similar stone matrices were used. The obtained results suggest revision of established ideas on sources of supply of stone raw materials during the late Bronze Age.

Keywords: petrography, meta-ultrabazites, Ukrainian Shield, casting molds, Bronze Age.

И. Никитенко¹, канд. геол. наук, доц.

E-mail: ihornikitenko@gmail.com;

А. Старик², канд. ист. наук

E-mail: segun.1@i.ua;

М. Куцевол¹, канд. геол. наук, доц.

E-mail: m.kutsevol@gmail.com;

¹Национальный технический университет "Днепропетровская политехника",

пр. Д. Яворницкого, 19, г. Днепро, 49005, Украина;

²Днепропетровский национальный исторический музей им. Д.И. Яворницкого,

пр. Д. Яворницкого, 18, г. Днепро, 49005, Украина

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕТРОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НАХОДКИ КАМЕННЫХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ ЭПОХИ БРОНЗЫ

Статья посвящена минералого-петрографическому исследованию сырья комплекса литейных форм эпохи бронзы, найденного экспедицией Днепропетровского национального исторического музея им. Д.И. Яворницкого во время раскопок памятника археологии Токовское-1, расположенного около с. Токовское Апостоловского района Днепропетровской области. Находка литейных форм имеет большое значение, поскольку может свидетельствовать о существовании бронзолитейного производства на территории памятника, который до этого трактовался лишь как мегалитическое культовое место. Определение происхождения сырья литейных форм может помочь выявить роль памятника археологии Токовское-1 в системе металлообрабатывающих центров сабакинского времени (XVI–XIII в. до н. э.) и установить его связи с древними центрами добычи каменного сырья. По материалам других петрографических исследований известно, что каменные литейные формы производились преимущественно из тальк-хлорит-тремолитовых сланцев, поскольку этот материал легко обрабатывался и выдерживал больше отливок чем глиняные формы. Поэтому каменные матрицы очень ценились, как и бронзовые изделия и слитки, и транспортировались на значительные расстояния. Целью работы было, на основании минералого-петрографического изучения сырья литейных форм, установить связи памятника археологии Токовское-1 с горнодобывающими и металлургическими центрами эпохи бронзы. В результате исследования образцов в прозрачных шлифах, а также при помощи рентгенофазового анализа, установлено, что каменные литейные формы были изготовлены из метаультрабазитов, преимущественно тремолит-хлорит-антофиллитового состава. Определение происхождения горных пород, из которых были изготовлены литейные формы, проводилось путем сравнения их минералого-петрографических особенностей с особенностями близких по составу пород, которые образуют природные обнажения, описанные в отчетах о геологической съемке, литературных источниках, а также наблюдавшихся нами в образцах горных пород с природных обнажений Среднего Приднепровья и Приазовья. Определено, что горные породы, из которых были изготовлены все литейные формы коллекции, не образуют природных обнажений в Среднем Приднепровье и не характерны для Криворожья, которое считается основным центром добычи сырья для каменных литейных форм эпохи поздней бронзы на территории Украины. Установлено, что похожие породы более характерны для Западного Приазовья, однако нельзя исключать и другой источник поступления сырья комплекса литейных форм, в частности Южный Урал, где была значительно развита металлургия бронзы и использовались похожие каменные матрицы. Полученные результаты поднимают вопрос о пересмотре установленных представлений об источниках поставки каменного сырья в эпоху поздней бронзы.

Ключевые слова: петрография, метаультрабазиты, Украинский щит, литейные формы, эпоха бронзы.

УДК 552.332+549(477)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.05>О. Дубина^{1,2}, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.;С. Кривдік¹, д-р геол.-мінералог. наук, проф.;В. Бельський¹, канд. геол. наук;О. Вишневський¹, канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.;¹Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,

пр. Акад. Палладіна, 34, м. Київ, 03680, Україна;

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

АКЦЕСОРНІ МІНЕРАЛИ РІДКІСНИХ МЕТАЛІВ У ГРОРУДИТАХ СХІДНОГО ПРИАЗОВ'Я (УКРАЇНА)

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

На відміну від інших докембрійських платформ і щитів, на території України лужні граніти та їхні гіпабісальні і ефузивні аналоги поширені обмежено. У Східному Приазов'ї відомі дайкові аналоги лужних гранітів (грорудити), які є дискретними за хімічним та мінералогічним складом і розглядаються як аналоги пантелеритів (егіринові високотитаністи) або комендитів (амфіболові низькотитаністи). Високотитаністи егіринові грорудити інтенсивніше збагачені некогерентними рідкісними елементами (REE, Zr, Nb) порівняно з низькотитаністими різновидами. Незважаючи на високий або підвищений вміст HFSE в грорудитах, у цих породах доволі мало їх власних мінералів-концентраторів. Так, у перших виявлено і проаналізовано такі мінерали рідкісних елементів, як монацит-(Ce), бастнезит-(Ce), бритоїтоподібний мінерал та рідкісноземельний апатит, циркон і остаточно невизначений мінерал цирконію, тоді як в амфіболовому грорудиті виявлені лише циркон і ніобієвмісний рутил. Згадані мінерали мають дуже дрібні розміри, найбільші з них можуть досягати 15–20 мкм (інколи до 50 мкм), більшість не перевищує 10 мкм (частіше 5–6 мкм). Припускається, що значна частина рідкісних металів ізоморфно входить до складу породотвірних мінералів (лужних піроксенів та амфіболів), а мінерали цирконію, принаймні їхня частина, є вторинними і утворилися за рахунок первинних натрієвих (евдіаліт, катаплетит, ілерит) або кальцієвих (гіттингіт) цирконосилікатів, характерних для перенасичених лугами (агпаїтових) порід. Зважаючи на петрологічні особливості і характер рідкісноземельної мінералізації грорудитів Приазов'я, є підстави вважати, що рідкіснометалічна мінералізація цих порід є наслідком диференціації первинного недонасиченого кремнеземом вихідного магматичного розплаву. Вторинні гідротермальні процеси слабо проявлялися у досліджуваних породах і приводять переважно до заміщення первинних акцесорних мінералів. Враховуючи підвищені або високі концентрації Nb у високотитаністих грорудитах і незначну кількість або відсутність власних Nb-мінералів, ймовірно, що фізико-хімічні параметри диференціації цих порід (низька концентрація F, висока fO₂ і гіпабісальні умови кристалізації) не сприяли їх кристалізації. Наявність грорудитів у цьому регіоні вказує на перспективи виявлення великих масивів подібних лужних гранітів (розкристалізованих аналогів грорудитів), з якими можуть бути пов'язані родовища та/або прояви Nb, REE, Zr, Sn, Be.

Ключові слова: грорудит, цирконієві мінерали, монацит-(Ce), бастнезит-(Ce), бритоїтоподібний мінерал, REE-апатит.

Вступ. Серед інших магматичних порід лужні різновиди містять найвищі концентрації Zr та інших HFSE, а з інтрузивними їх комплексами часто пов'язані значні ресурси цих елементів. Масиви лужних гранітів або лужних порід сієніто-гранітоїдного складу в багатьох країнах є економічними або потенційно економічними ресурсами HFSE: Strange Lake (Канада) у гранітах якого відома Zr, Y, REE, Nb мінералізація (Miller, 1986, 1990; Zajac, 1992); Khaldzan-Buregtey (Монголія), що містить великі ресурси Zr, Nb і REE (Kovalenko et al., 1995); комплекс Amis (Намібія) із Zr, Nb і REE мінералізацією (Schmitt et al., 2000).

Незважаючи на велику кількість геологічної літератури, що стосується лужних гранітів, генезис асоціюючої з ними HFSE мінералізації часто залишається дискусійним, особливо, що стосується головних рудоконтролюючих процесів. Вважається, що більшість родовищ HFSE виникає у результаті поєднання магматичних та гідротермальних процесів, хоча в деяких випадках один з цих процесів може бути домінуючим.

На відміну від інших докембрійських платформ і щитів, на території України лужні граніти та їхні гіпабісальні й ефузивні аналоги поширені обмежено. На даний час відомі егіринові і рибекітові лужні різновиди серед пержанських гранітів, а також дайкові аналоги пантелеритів і комендитів (грорудити) у Східному Приазов'ї. Геологічне положення, особливості хімічного складу, їхні петрографічні і геохімічні характеристики більш детально розглядаються в роботах (Бутурлинов, 1979; Елисеев и др., 1965; Кривдік та Ткачук, 1996; Дубина та Кривдік, 2013; Шаталов, 1986). Грорудити є одними з найцікавіших лужних порід у петрологічному та геохімічному аспектах і все ще залишаються досить слабо вивченими. Як було показано у попередніх публікаціях авторів (Кривдік та Ткачук, 1996; Дубина та Кривдік, 2013), у Східному Приазов'ї грорудити представлені дайковими породами, які є дискретними за

хімічним та мінералогічним складом і розглядаються як аналоги пантелеритів (егіринові високотитаністи) або комендитів (амфіболові низькотитаністи). До того ж дайки егіринових та амфіболових різновидів мають різне простягання (північно-західне і субширотне відповідно). Крім того, пантелеритові аналоги егіринових грорудитів характеризуються доволі високим (як для лужних гранітів) вмістом титану (0,9–1,43 % TiO₂), а також таких несумісних елементів, як Zr, Nb, LREE. Власних мінералів цих елементів раніше не було виявлено, лише у протолітичних пробах згадувалися їхні поодинокі знахідки і у незначних кількостях (циркон, рутил, чераліт) (Кривдік та Ткачук, 1996). Ймовірно, це зумовлено тим, що виділення акцесорних мінералів рідкісних елементів у грорудитах є переважно доволі дрібними (соті, рідше десяті частки міліметра), а у процесі підготовки проб цих порід (зважаючи на їх високу щільність і твердість) ці мінерали роздрібнювалися і розтиралися, а під час промивки попадали у шламові фракції. Виконані останнім часом дослідження зразків егіринових і амфіболових грорудитів дали можливість виявити і проаналізувати власні мінерали названих вище рідкісних елементів. Проте результати цих досліджень, яким присвячується стаття, на погляд авторів не є повністю завершеними, а швидше першим і важливим етапом у вивченні речовинного складу цих цікавих і рідкісних для України порід.

Мета – виявити мінерали-концентратори рідкісних елементів у егіринових і амфіболових грорудитах Східного Приазов'я та з'ясувати залежність їхнього складу від петрологічних та геохімічних особливостей утворення цих порід.

Методи досліджень. Досліджувалися три зразки грорудитів (два з них егіринові високотитаністи і один амфіболовий низькотитаністий) електронним мікрозондом JCSA-733 (JEOL), оснащеним трьома вертикальними

хвильовими спектрометрами. Умови зйомки: прискорювальна напруга – 15 кВ, струм зонда 20 нА, діаметр зонда 2 мкм; час виміру в точці: пік – 30 с, фон з обох сторін – по 10 с. Хімічний склад мінералів рідкісних металів визначали за допомогою електронного мікроскопа JSM-6700F, обладнаного енергодисперсійним спектрометром JED-2300 (JEOL) та на рентгенівському мікроаналізаторі JXA-733. Умови аналізу були такими: прискорювальна напруга 20 кВ, струм зонда 1,0 нА (для JSM-6700F) і 20 нА (для JXA-733), розмір зонда 1-3 мкм, час набору рентгенівського спектра в одній точці – 90 с. Як стандарти використовувалися чисті метали, синтетичні сполуки та природні мінерали. Вимірювання проводились в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення Національної академії наук України. Внесення поправок у результати вимірів і розрахунків концентрацій елементів здійснювалися методом ZAF-корекції.

Форми і розміри виділень акцесорних мінералів та особливості їхнього хімічного складу. Як зазначалося в попередніх публікаціях (Кривдік та Ткачук, 1996; Дубина та Кривдік, 2013), високотитанисті егіринові грорудити інтенсивніше збагачені некогерентними рідкісними елементами (REE, Zr, Nb) порівняно з низькотитанистими різновидами. Це відбилося і на кількості акцесорних мінералів які трапляються в цих породах. Так, у перших (два зразки) виявлено і проаналізовано такі мінерали рідкісних елементів, як монацит-(Ce), бастнезит-(Ce), брیتолітоподібний мінерал та рідкісноземельний апатит, циркон і остаточно невизначений мінерал цирконію, тоді як в амфіболовому грорудиті виявлені лише циркон і ніобієвмісний рутил. Як зазначалося вище, ці мінерали дуже дрібні, найбільші з них можуть досягати за видовженням 15–20 μm (інколи до 50 μm), більшість не перевищує 10 μm (частіше 5–6 μm). Виділення зазначених мінералів найчастіше мають невизначені ("неправильні") форми без якихось рівних кристалографічних обрисів і лише розрізи деяких з них інколи наближаються до чотирикутних трапецієподібних.

Мінерали рідкісних земель виявлено і проаналізовано в егіринових грорудитах. Найчастіше з них трапляються бастнезит-(Ce) і монацит-(Ce), рідше брیتолітоподібний мінерал та рідкісноземельний апатит.

Бастнезит-(Ce) загалом утворює скупчення дрібних кристаликів у міжзерновому просторі, найбільші з яких не перевищують 5 μm (рис. 1). Дрібними розмірами кристалів пояснюється підвищений вміст у деяких з отриманих аналізів компонентів не властивих цьому мінералу (Si, Al, Fe). Як це загалом властиво досліджуваним грорудитам, у бастнезиті-(Ce) різко переважають легкі лантаноїди, а вміст Y_2O_3 становить 0,6–1,2 % (табл. 1, ан. 1–3). Власне ітрієвих мінералів у грорудитах не виявлено. У бастнезиті присутній низький вміст CaO (1,0–2,8 %).

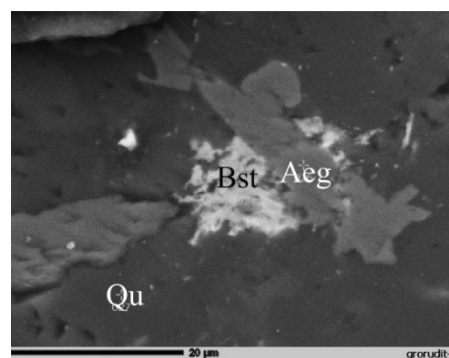


Рис. 1. Складне зростання кристаликів бастнезиту (Bst) із егірином (Aeg)

Другим із рідкісноземельних мінералів за поширенням є монацит-(Ce) (табл. 1, ан. 4) P_2O_5 – 24 %. Схоже на те, що дрібні виділення монациту-(Ce) тісно зростаються з бастнезитом-(Ce) і, можливо, з брیتолітом-(Ce) (наявність SiO_2). У крупніших зернах монациту фіксується підвищений вміст CaO (до 4,9 %), а також PbO (2,1 %). Ймовірно, згадуваний у попередніх публікаціях (Кривдік та Ткачук, 1996) чераліт і є проаналізованим нині кальційвмісним монацитом-(Ce).

Таблиця 1

Хімічний склад акцесорних мінералів із грорудитів Східного Приазов'я

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SiO_2	2,23	3,04	10,08	13,17	14,34	11,34	6,01	34,28	36,56	42,89	37,37	39,14	37,13	32,84	36,24	30,71
Al_2O_3		0,68	1,62	0,89	3,16	1,45	1,29	2,13	3,3	4,23	1,28	0,94	2,78	0,98	3,88	3,05
FeO			4,05	4,92	1,41	3,21	0,69	3,56	2,21	9,9	8,8	15,52	1,2	1,87	1,85	5,05
CaO	1,33	1,00	2,77	4,93	3,18	3,95	29,4	1,07	2,55	0,71	1,82	1,47	0,85	1,08	0,83	1,29
K_2O	0,26	0,86	0,24				0,21					0,16			1,99	1,35
P_2O_5		1,65		24,39	0,02	1,65	36,57									
CO_2	68,60	66,23														
F	0,96	4,12														
PbO_2			0,77	2,09		1,11		0,6	0,85	0,24		1,89			0,7	0,25
Y_2O_3	1,16	1,07	0,55		0,45	0,57	0,47	1,47	1,81	1,53	2,10	1,24	7,8	8,4	2,25	1,90
La_2O_3	3,89	3,49	13,07	9,48	12,15	12,89	4,52		0,17	0,24		0,19			0,12	1,75
Ce_2O_3	12,24	9,71	24,92	21,52	27,1	27,38	14,37	0,15	0,17	0,65		0,89			0,45	3,69
Pr_2O_3	1,84	2,16	2,38	1,79	2,72	2,51	1,01									
Nd_2O_3	7,50	7,63	9,47	8,12	9,92	9,91	6,03				0,01	0,63			0,2	1,35
Gd_2O_3			1,33	0,65	0,87	0,91	0,29									
Dy_2O_3			0,35	0,14	0,36		0,12									
Th_2O_3			0,11	1,94	0,58	0,75	0,18								0,72	0,44
UO_2			0,51	1,39	0,31	1,33	0,53	1,83	1,5	2,28	2,31	0,74				0,26
ZrO_2								50,8	40,29	32,36	33,57	38,62	50,23	54,84	38,14	35,93
Nb_2O_5								0,37	1,15	0,65	0,87	0,92			1,4	1,62
Сума	100	100	72,21	97,38	76,55	78,96	101,73	96,3	90,56	95,67	88,14	102,4	99,99	100,0	88,78	88,64

1–3 – бастнезит-(Ce); 4 – монацит-(Ce), в суму також входить 1,94 % SO_3 ; 5, 6 – брیتолітоподібний мінерал; 7 – рідкісноземельний апатит; 8–12 – циркони; 13, 14 – циркони з високим вмістом Y; 15, 16 – недиагностовані цирконієві мінерали з підвищеним вмістом Y і Nb.

Брیتолітоподібний мінерал (табл. 1, ан. 5, 6), також як і більшість інших акцесорних мінералів утворює дрібні поодинокі кристалики розміром 5–10 μm , що часто

виділяються на периферії зерен егірину або у безпосередній близькості від нього. Виділення мінералу неоднорідні і, можливо, утворюють тонкі проростання із

бастнезитом-(Ce) або, ймовірно, з монацитом, оскільки у деяких аналізах відмічається підвищений вміст фосфору (до 1,65 % P_2O_5) і свинцю (до 1,1 % PbO). Як згадувалося вище, саме монацит характеризується підвищеним вмістом останнього елементу. В бритолітоподібному мінералі дещо понижений (як для бритоліту) вміст CaO (2,69–3,95 %), а склад рідкісних земель суттєво церієвий (вміст Y_2O_3 становить 0,45–0,57 %).

Рідкісноземельний апатит є, на нашу думку, найбільш несподіваним мінералом у грорудитах, якщо зважати на низький вміст CaO (0,2–0,4, в одному аналізі до 1,7 %) і P_2O_5 (0,03–0,09 %) у досліджуваних породах. Зафіксовано лише одне зерно неправильної форми розміром 6 x 10 μm і доволі неоднорідне за будовою. Можливо цей апатит зростає з бастнезитом, проте, судячи з високого вмісту CaO (29,43 %) і P_2O_5 (36,57 %), матрицю цього зерна утворює саме апатит. В аналізі апатиту фіксується досить високий вміст рідкісних земель (26,3 % REE $_2O_3$), серед яких суттєво переважають легкі лантаніди (14,37 % Ce_2O_3). Високий вміст останніх у апатиті, а також підвищені концентрації радіоактивних елементів, також можуть свідчити про можливість часткового захоплення пучком мікрозонду інших рідкісноземельних чи радіоактивних мінералів (монациту-(Ce) чи бастнезиту-(Ce)).

Мінерали цирконію представлені власне цирконом і не діагностованим цирконієвим мінералом з підвищеним

вмістом Nb_2O_5 (до 1,62 %), Y_2O_3 (до 2,4 %), UO_2 (до 2,31 %), у поодиноких аналізах рідкісних земель (La_2O_3 –1,9; Ce_2O_3 –3,69; Nd_2O_3 –1,35 %) (табл. 1, рис. 2). Окремі зерна циркону характеризуються доволі високим вмістом Y_2O_3 (до 8,4%) (рис. 3). Ймовірно, це єдиний мінерал грорудитів з таким досить високим вмістом ітрію.

Щодо другого цирконієвого мінералу, то його також не вдалося детально проаналізувати через вкрай малі розміри (до 10 μm). Як видно з наведених у табл. 1 даних, у цьому мінералі Si переважає над Zr+Y+Nb зі співвідношенням від 1,4:1 до 2,2:1. Мінерал умовно можна класифікувати як хагатоліт (через підвищений вміст Nb, Y, іноді REE, U), хоча переважання в ньому Si над Zr дещо наближає його до гіттингситу (з низьким вмістом CaO). Мінерал потребує додаткових досліджень.

Мінерали ніобію. Хоча вміст Nb в егіринових грорудитах досить значний (за результатами XRF – 110–486, а в одному аналізі – 1218 ppm, а ICP MS – в одному аналізі 240 ppm), виявити власні мінерали цього елементу не вдалося. Натомість в амфіболовому грорудиті, де вміст Nb значно нижчий (88 ppm за даними ICP MS і 133 ppm за даними XRF), зафіксовано рутил з вмістом Nb_2O_5 до 6,76 % (табл. 2, рис. 4, 5). Такий рутил утворює включення в залізістому мінералі типу магнетиту або гематиту (до 3,82 TiO_2) або спостерігається серед кварцу.

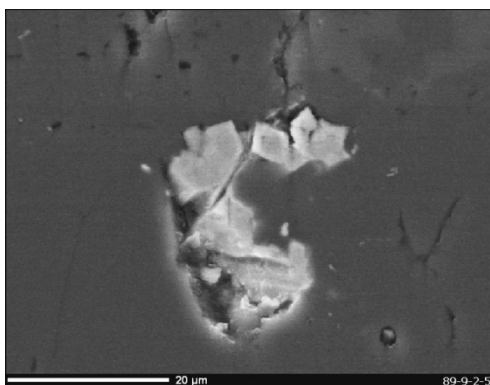


Рис. 2. Скупчення дрібних ромбоподібних кристаліків циркону

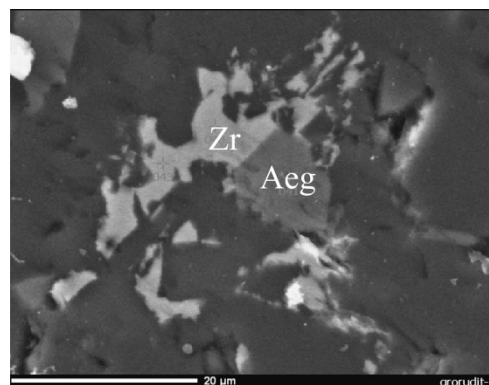


Рис. 3. Зростання циркону (Zr) з високим вмістом ітрію (ан. 14) та егірину (Aeg)

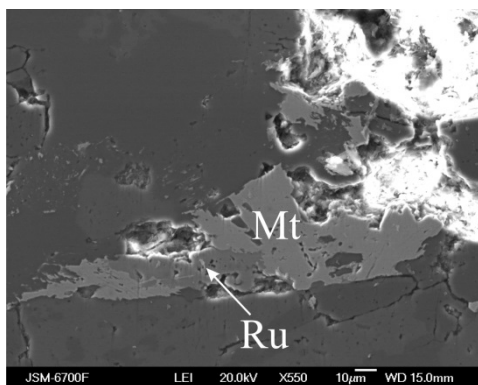


Рис. 4. Проростання рутилу з підвищеним вмістом Nb (Ru) (Табл. 2, ан. 1–3) із магнетитом (Mt)

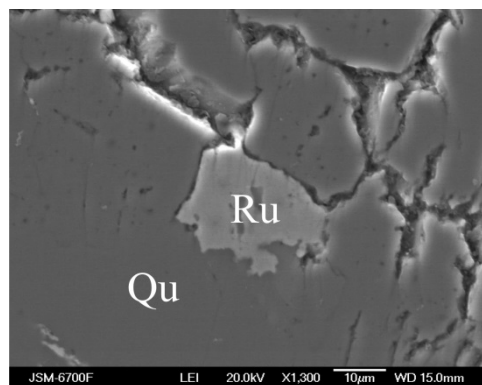


Рис. 5. Дрібний ксеноморфний кристалік рутилу (Ru) з високим вмістом Nb (Табл. 2, ан. 4–6) серед кварцу (Qu)

Таблиця 2

Хімічний склад ніобієвмісного рутилу

	1	2	3	4	5	6
TiO_2	94,3	94,69	94,1	92,2	92,3	92,37
FeO	1,68	2,25	2,87	1,05	1,03	1,13
Nb_2O_5	3,99	3,06	3,05	6,76	6,65	6,5
Сума	100	100	100	100	100	100

Можливо, що більша частина Nb ізоморфно входить до складу інших мінералів (як, наприклад, у зазначеному

вище не діагностованому цирконієвому мінералі) або ж ніобатів не було виявлено у досліджуваних препаратах (аншлафах-шашках) порід.

Обговорення результатів та деякі висновки. Геохімічні дані свідчать про те, що вторинні зміни апаїтових кислих порід проявляються у значному збагаченні на Ca, F і HFSE. Тому значна частина дослідників цих порід вважають, що гідротермальні процеси відіграють ключову роль у формуванні Zr-Nb-Y-REE мінералізації (Salvi and

Williams-Jones 1990, 1996). Хоча, як вже згадувалося вище, відповідь на це питання не завжди вирішується однозначно. Так, для аґаїтових гранітів родовищ Khadlzan (Монголія) збагачення на Zr, Nb, REE та Y розглядається як з позиції магматичного фракціонування (Kovalenko et al., 1995), так і як результат інтенсивних вторинних змін (Andreev et al., 1994; Andreev and Ripp, 1996). Важливість магматичних процесів для суттєвого збагачення HFSE, з наступним формуванням економічно рентабельних для видобутку покладів цих елементів, впливає із досліджень розплавних включень, які, на жаль, для грорудитів Приазов'я не виконувалися. Такі дослідження свідчать, що концентрація HFSE в аґаїтових кислих магмах на порядок вища, ніж в інших типах кислих розплавів, і у деяких випадках може досягати відсоткових рівнів. Наприклад, концентрації Zr, Nb і REE досягає 2,7, 0,6 і 0,3 мас.% у розплавних включеннях із аґаїтового граніту масиву Khadlzan-Buregtey (Kovalenko et al. 1995), аналогічні концентрації цих металів зафіксовано у включеннях із аґаїтових гранітів комплексу Amis (Schmitt et al., 2002).

Незважаючи на високий або підвищений вміст рідкісних некогерентних елементів (Zr, REE, Nb) у грорудитах, у цих породах доволі мало акцесорних мінералів названих елементів. До того ж ці мінерали найчастіше утворюють дрібні зерна без виражених кристалографічних обрисів. Ймовірно, значна частина зазначених рідкісних металів ізоморфно входить до складу породотвірних мінералів (лужних піроксенів та амфіболів). Так, у двох еґіринах хімічним аналізом було визначено 0,87 і 0,20 % ZrO_2 (Кривдік та Ткачук, 1996). Можна також припустити, що мінерали цирконію, принаймні їх частина, є вторинними і утворилися за рахунок первинних натрієвих (евдіаліт, катапліт, ілерит) або кальцієвих (гітінґсит) цирконосилікатів, характерних для перенасичених лугами (аґаїтових) порід. Одним з авторів (Кривдік та Ткачук, 1990) припустилося, що у маріуполітах Октябрьського масиву первинними мінералами цирконію були натрієві та/або кальцієві цирконосилікати (евдіаліт, катапліт), як це було виявлено в аґаїтових фонолітах (Шарьгин і др., 2012). Підтвердженням цього припущення стали виконані останнім часом дослідження (Квасниця та ін., 2016), згідно з якими в дипірамідальних кристалах циркону маріуполітів виявлені релікти катапліту. Можливо подібну вторинну природу мають монацит-(Ce) та бастнезит-(Ce) із грорудитів.

Зважаючи на особливості мінерального складу, геохімічні особливості і характер рідкісноземельної мінералізації грорудитів Приазов'я, є підстави вважати, що рідкіснометалічна мінералізація цих порід є наслідком диференціації первинного магматичного розплаву. Багатьма дослідниками перенасичені кремнеземом аґаїтові породи вважаються похідними корою контамінації мантийних ненасичених кремнеземом лужних магм (Goodenough et al., 2000; Marks et al., 2003). Враховуючи девонський вік вкорінення дайок грорудитів, найбільш логічно, на думку авторів, припустити, що вихідні лужні розплави були подібні до тих, з яких кристалізувалися породи Покрово-Київської структури (Дубина та Кривдік, 2013). Як відомо, первинні недонасичені кремнеземом лужні розплави є результатом незначного часткового плавлення мантийного джерела за відносно сухих і відновних умов, що вже на етапі зародження створює сприятливі умови для збагачення HFSE. У процесі еволюції вони можуть суттєво збагачуватися леткими компонентами (Cl та F) та лужними металами (Na та K), що, у свою чергу, суттєво знижує солідус і дозволяє диференціювати таким розплавам до незвично низьких температур (до $\sim 400^\circ C$ за даними Scaillet and

Macdonald, 2001; Markl et al., 2001) та відділення флюїдної фази. Крім того, підвищена аґаїтність розплавів, високі концентрації лугів і фтору підвищують розчинність HFSE за рахунок утворення лужно-силікатних та/або лужно-фторидних комплексів та збільшенню частки незв'язаного кисню, порівняно із метаґліноземистими і плюмазитовими розплавами, і дає можливість концентрувати більш інтенсивно HFSE (Scarfe, 1977; Watson, 1979; Collins et al, 1982; Collerson, 1982). Експериментальні дослідження показують, що розчинність Zr у метаґліноземистих і плюмазитових розплавах становить < 100 ppm (Watson, 1979; Hanchar and Watson, 2003), тоді як в аґаїтових розплавах його розчинність нерідко > 1 мас.% (Kogarko, 1990; Marr et al., 1998). Тому залишкові порції первинної магми є надзвичайно диференційованими (аґаїтові, високосалістисті) і насичені мінералами Zr, Y, Nb і REE, кристалізація яких також починається на пізніх етапах після відділення флюїдної фази. Враховуючи ці дані по формуванню пересичених лугами кислих порід, а також аґаїтову специфіку грорудитів, їх мінералогічні і геохімічні особливості, є підстави розглядати їх як результат розкристалізації залишкових порцій первинного недонасиченого кремнеземом вихідного розплаву. Зважаючи на високі концентрації HFSE і незначну кількість мінералів-концентраторів цих елементів у грорудитах, можна стверджувати, що рівень їх концентрації є результатом первинномагматичної диференціації розплаву, тоді як гідротермальні вторинні процеси слабо проявлені у досліджуваних породах і приводять переважно до заміщення первинних акцесорних мінералів. Про відсутність або незначний вплив вторинних перетворень грорудитів свідчить досить високе співвідношення в них Nb/Ta (~ 15), низький вміст (ppm): Sn (8–12), Cs (0,2–0,3), W (0,9–1,2) та Rb (178–199), а також низька (у наведених в літературі хімічних аналізах) концентрація летких компонентів (H_2O , Cl, F і CO_2), які могли б підсилити ефект фракційної кристалізації та збільшити час диференціації розплаву. Можливо, що низький вміст летких компонентів (особливо F) або їх раннє відділення із залишкового розплаву, може пояснити відсутність власних мінералів концентраторів Nb. Як відомо, Nb і Ta слабо розчиняються у водних розчинах, при цьому Ta є ще менш розчинним, ніж Nb (Zaraisky et al., 2010). Експерименти з водними F-розчинами і алюмосилікатним розплавом вказують, що Nb і Ta переходять переважно у розплав (Chevychelov et al., 2005). Однак розчинність та гідротермальний перенос Ta і Nb значно підсилюється за умов існування багатих F розчинів і відновних умов (Zaraisky et al., 2010). Тому, зважаючи на підвищені або високі концентрації Nb у грорудитах, фізико-хімічні параметри кристалізації дайкових порід (низька концентрація F, висока fO_2 і нетривалий час кристалізації), ймовірно, не сприяли появі власних Nb-мінералів.

Цілком ймовірно припустити, що кристалізація потужніших тіл або інтрузій грорудитів (аґаїтових лужних гранітів) відбувалася у більш флюїдонасичених умовах і, відповідно, диференціація розплаву була більш тривалою. Тому, HFSE у таких тілах повнокристалічних аналогів лужних гранітів могли б сконцентруватися в більших об'ємах ще на етапах розкристалізації розплаву, а за умови наступного відділення збагаченої леткими компонентами і збагаченої на HFSE флюїдної фази, цей ефект міг підсилюватися з подальшим їх перерозподілом і нагромадженням в апікальних частинах та утворенням власних мінералів. Подальші мінералогічні та геохімічні дослідження грорудитів Східного Приазов'я можуть мати, крім петрологічного та мінералогічного, також практичне значення. Якщо в цьому регіоні буде вияв-

лено хоча б невеликі масиви лужних гранітів (розкриті в аналогічних аналогів грорудитів – пантелеритів-комендітів), то з ними можуть бути пов'язані рудопрояви або й родовища Nb, REE, Zr, Sn, Be, подібні до таких у пержанських гранітах або родовищ Катугіно (Алданський щит, РФ). При цьому слід зауважити, що такі невеликі масиви лужних гранітів у Східному Приазов'ї могли бути "пропущеними" під час геологічного картування, оскільки більш крупнозернисті розкриті в аналогічних різновиди грорудитів (власне лужні граніти) у центральних частинах деяких дайок (наприклад, б. Талова) макроскопічно майже не відрізняються від навколишніх вмісних гранітоїдів.

Список використаних джерел

- Андреев, Г.В., Рипп, Г.С. (1996). Редкоматальные эпидот-кварцевые метасоматиты массива Халдзан-Буретэг. *Зап. Всерос. минерал. об-ва*, 125, 6, 24–30.
- Андреев, Г.В., Рипп, Г.С., Шаракшинов, А.О., Минин, А.Д. (1994). Редкоматальная минерализация щелочных гранитоидов Западной Монголии. Улан-Удэ: Изд-во Бурятск. науч. центра.
- Бутурлинов, Н.В. (1979). Магматизм грабенообразных прогибов юга Восточно-Европейской платформы в фанерозое. *Автореф. ... дис. д-ра геол.-минералог. наук*. 04.00.08. "Петрография, вулканология". Киев.
- Дубина, О.В., Кривдик, С.Г. (2013). Геохімія грорудитів Східного Приазов'я. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1, 8–11.
- Елисеев, Н.А., Кушев, В.Г., Виноградов, Д.П. (1965). Протерозойский интрузивный комплекс Восточного Приазовья. М.: Л.: Наука.
- Квасниця, В.М., Вишневыский, О.А., Квасниця, І.В., Гурненко, І.В. (2016). Діпірамідальні кристали циркону із лужних порід Приазов'я. *Мінералогічний журнал*, 38, 9–23.
- Кривдик, С.Г., Возняк, Д.К., Шаригін, В.В., Дубина, О.В. (2012). Мінерали лужних порід України. *Записки Українського мінералогічного товариства*, 9, 7–34.
- Кривдик, С.Г., Ткачук, В.І. (1990). Петрологія щелочных пород Украинского щита. Киев: Наукова думка.
- Кривдик, С.Г., Ткачук, В.І. (1996). Грорудити Східного Приазов'я. *Мінералогічний журнал*, 3, 67–83.
- Шаталов, Н.Н. (1986). Дайки Приазовья. Киев: Наукова думка.
- Collerson, K.D. (1982). Geochemistry and Rb-Sr geochronology of associated proterozoic peralkaline and subalkaline anorogenic granites from Labrador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81, 126–147.
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W. (1982). Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeast Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80, 189–200.
- Goodenough, K.M., Upton, B.G.J., Ellam, R.M. (2000). Geochemical evolution of the Ivigtut Granite, South Greenland: a fluorine-rich "A-type" intrusion. *Lithos*, 51, 205–221.
- Hanchar, J.M., Watson, E.B. (2003). Zircon saturation thermometry. In Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Zircon, 53, 89–112.
- Kogarko, L.N. (1990). Ore-forming potential of alkaline magmas. *Lithos*, 26, 167–175.
- Kovalenko, V.I., Tsaryeva, G.M., Goreglyad, A.V., Yarmoluk, V.V., Troitsky, V.A. (1995). The peralkaline-granite related Kialdsan-Buregiey Rare metal (Zr, Nb, REE) deposit Western Mongolia. *Economic Geology*, 90, 530–547.
- Markl, G., Marks, M., Schwinn, G., Sommer, H. (2001). Phase equilibrium constraints on intensive crystallization parameters of the Illimaussaq Complex, South Greenland. *Journal of Petrology*, 42, 2231–2258.
- Marks, M., Vennemann, T., Siebel, W., Mark, L.G. (2003). Quantification of magmatic and hydrothermal processes in a peralkaline syenite-alkali granite complex based on textures, phase equilibria, and stable and radiogenic isotopes. *Journal of Petrology*, 44, 1247–1280.
- Marr, R.A., Baker, D.R., Williams-Jones, A.E. (1998). Chemical controls on the solubility of Zr-bearing phases in simplified peralkaline melts and application to the Strange Lake intrusion, Quebec-Labrador. *Canadian Mineralogist*, 36, 1001–1008.
- Miller, R.R. (1986). Geology of the Strange Lake Alkaline Complex and the associated Zr-Y-Be-REE mineralization. Newfoundland Department of Mines and Energy. *Mineral Development Division, Report 86-1*, 11–19.
- Miller, R.R. (1990). The Strange Lake pegmatite-aplite hosted rare metal deposit, Labrador. Newfoundland Department of Mines and Energy. *Geological Survey Branch, Report 90-1*, 171–182.
- Salvi, S., Williams-Jones, A.E. (1990). The role of hydrothermal processes in the granite hosted Zr, Y, REE deposit at Strange Lake, Quebec/Labrador: evidence from fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2403–2418.
- Salvi, S., Williams-Jones, A.C. (1996). The role of hydrothermal processes in concentrating HFSE in the Strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1917–1932.
- Salvi, S., Williams-Jones, A.E. (2005). Alkaline granite-syenite deposits. In Linnen R.L., Samson I., Breaks F.W. *Rare-element geochemistry and mineral deposits*. Geological Association of Canada.
- Scaillet, B., MacDonald, R. (2001). Phase relations of peralkaline silicic magmas and petrogenetic implications. *Journal of Petrology*, 42, 825–845.
- Scarfe, C.M. (1977). Viscosity of a pantellerite melt at one atmosphere. *Canadian Mineralogist*, 15, 185–189.

Schmitt, A.K., Emmermann, L.R., Trumbull, R.B., Böhn, B., Henjes Kunst, F. (2000). Petrogenesis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Brandberg Complex, Namibia: evidence of major mantle contribution in mantle and peralkaline granites. *Journal of Petrology*, 41, 559–576.

Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., Dulski, P., Emmermann, R. (2002). Zr-Nb-REE mineralization in peralkaline granites from the Arnis Complex, Brandberg (Namibia): evidence for magmatic pre-enrichment from melt inclusions. *Economic Geology*, 97, 399–413.

Watson, E.B. (1979). Zircon saturation in felsic liquids: Experimental results and applications to trace element geochemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 407–419.

Zajac, J.S. (1992). The Strange Lake Complex and its yttrium and zirconium mineralization. *Society for Mining Metallurgy and Exploration Abstract*, 69.

Zaraisky, G.P., Korzhinskaya, V., Kotova, N. (2010). Experimental studies of Ta_2O_5 and columbite-tantalite solubility in fluoride solutions from 300 to 550°C and 50 to 100 MPa. *Mineralogy and Petrology*, 99, 287–300. <https://doi.org/10.1007/s00710-010-0112-z>

Chevychelov, V.Y., Zaraisky, G.P., Borisovskii, S.E., Borkov, D.A. (2005). Effect of melt composition and temperature on the partitioning of Ta, Nb, Mn, and F between granitic (alkaline) melt and fluorine-bearing aqueous fluid: Fractionation of Ta and Nb and conditions of ore formation in rare-metal granites. *Petrology*, 13, 305–321.

Reference

- Andreev, G.V., Ripp, G.S. (1996). Rare-metal epidote-quartz metasomatites of the Khaldzan Buregteg massif. *Zap. Vses. Mineral. Obshch.*, 125, 24–30. [in Russian]
- Andreev, G.V., Ripp, G.S., Sharakshinov, A.O., Minin, A.D. (1994). Rare-metal mineralization in alkaline granitoids of Western Mongolia. Ulan Ude: BNTS SO RAN. [in Russian]
- Buturilov, N.V. (1979). Magmatism of graben depression of south part of the East-European platform in Fenerozoic. *Extended abstract ... Doctor's thesis (Geology and Mineralogy Science)*: 04.00.08. Kyiv. [in Russian]
- Chevychelov, V.Y., Zaraisky, G.P., Borisovskii, S.E., Borkov, D.A. (2005). Effect of melt composition and temperature on the partitioning of Ta, Nb, Mn, and F between granitic (alkaline) melt and fluorine-bearing aqueous fluid: Fractionation of Ta and Nb and conditions of ore formation in rare-metal granites. *Petrology*, 13, 305–321.
- Collerson, K.D. (1982). Geochemistry and Rb-Sr geochronology of associated proterozoic peralkaline and subalkaline anorogenic granites from Labrador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 81, 126–147.
- Collins, W.J., Beams, S.D., White, A.J.R., Chappell, B.W. (1982). Nature and origin of A-type granites with particular reference to southeast Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80, 189–200.
- Dubyna, O.V., Kryvdik, S.G. (2013). Geochemistry of grorudites of Eastern Azov region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1, 8–11. [in Ukrainian]
- Eliseev, N.A., Kushev, V.G., Vinogradov, D.P. (1965). Proterozoic intrusive complex of the Eastern Azov region. Moscow-Leningrad: Nauka. [in Russian]
- Goodenough, K.M., Upton, B.G.J., Ellam, R.M. (2000). Geochemical evolution of the Ivigtut Granite, South Greenland: a fluorine-rich "A-type" intrusion. *Lithos*, 51, 205–221.
- Hanchar, J.M., Watson, E.B. (2003). Zircon saturation thermometry. In Hanchar J.M., Hoskin P.W.O. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Zircon, 53, 89–112.
- Kogarko, L.N. (1990). Ore-forming potential of alkaline magmas. *Lithos*, 26, 167–175.
- Kovalenko, V.I., Tsaryeva, G.M., Goreglyad, A.V., Yarmoluk, V.V., Troitsky, V.A. (1995). The peralkaline-granite related Kialdsan-Buregiey Rare metal (Zr, Nb, REE) deposit Western Mongolia. *Economic Geology*, 90, 530–547.
- Kryvdik, S.G., Tkachuk, V.I. (1990). Petrology of alkaline rocks of the Ukrainian Shield. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Kryvdik, S.G., Tkachuk, V.I. (1996). Grorudites of Eastern Azov region. *Mineralogical journal*, 3, 67–83. [in Ukrainian]
- Kryvdik, S.G., Voznyak, D.K., Sharygin, V.V., Dubyna, O.V. (2012). Minerals of alkaline rocks of Ukraine. *Proceedings of the Ukrainian Mineralogical Society*, 9, 7–34. [in Ukrainian]
- Kvasnytsya, V.M., Vyshnevskiy, O.A., Kvasnytsya, I.V., Gumenko, I.V. (2016). Dipyratidial zircon crystals from alkaline rocks of the Azov Region. *Mineralogical journal*, 38, 9–23. <https://doi.org/10.15407/mineraljournal.38.03.009>
- Markl, G., Marks, M., Schwinn, G., Sommer, H. (2001). Phase equilibrium constraints on intensive crystallization parameters of the Illimaussaq Complex, South Greenland. *Journal of Petrology*, 42, 2231–2258.
- Marks, M., Vennemann, T., Siebel, W., Mark, L.G. (2003). Quantification of magmatic and hydrothermal processes in a peralkaline syenite-alkali granite complex based on textures, phase equilibria, and stable and radiogenic isotopes. *Journal of Petrology*, 44, 1247–1280.
- Marr, R.A., Baker, D.R., Williams-Jones, A.E. (1998). Chemical controls on the solubility of Zr-bearing phases in simplified peralkaline melts and application to the Strange Lake intrusion, Quebec-Labrador. *Canadian Mineralogist*, 36, 1001–1008.
- Miller, R.R. (1986). Geology of the Strange Lake Alkaline Complex and the associated Zr-Y-Be-REE mineralization. Newfoundland Department of Mines and Energy. *Mineral Development Division, Report 86-1*, 11–19.
- Miller, R.R. (1990). The Strange Lake pegmatite-aplite hosted rare metal deposit, Labrador. Newfoundland Department of Mines and Energy. *Geological Survey Branch, Report 90-1*, 171–182.

Salvi, S., Williams-Jones, A.C. (1996). The role of hydrothermal processes in concentrating HFSE in the Strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 1917-1932.

Salvi, S., Williams-Jones, A.E. (1990). The role of hydrothermal processes in the granite hosted Zr, Y, REE deposit at Strange Lake, Quebec/Labrador: evidence from fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, 2403-2418.

Salvi, S., Williams-Jones, A.E. (2005). Alkaline granite-syenite deposits. In Linnen R.L., Samson I., Breaks F.W. Rare-element geochemistry and mineral deposits. Geological Association of Canada.

Scaillet, B., MacDonald, R. (2001). Phase relations of peralkaline silicic magmas and petrogenetic implications. *Journal of Petrology*, 42, 825-845.

Scarfe, C.M. (1977). Viscosity of a pantellerite melt at one atmosphere. *Canadian Mineralogist*, 15, 185-189.

Schmitt, A.K., Emmermann, L.R., Trumbull, R.B., Bühn, B., Henjes Kunst, F. (2000). Petrogenesis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of the Brandberg Complex, Namibia: evidence of major mantle contribution in mantle and peralkaline granites. *Journal of Petrology*, 41, 559-576.

Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., Dulski, P., Emmermann, R. (2002). Zr-Nb-REE mineralization in peralkaline granites from the Amis Complex, Brandberg (Namibia): evidence for magmatic pre-enrichment from melt inclusions. *Economic Geology*, 97, 399-413.

Shatalov, N.N. (1986). Dikes of the Azov region. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]

Watson, E.B. (1979). Zircon saturation in felsic liquids: Experimental results and applications to trace element geochemistry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 407-419.

Zajac, J.S. (1992). The Strange Lake Complex and its yttrium and zirconium mineralization. *Society for Mining Metallurgy and Exploration Abstract*, 69.

Zaraisky, G.P., Korzhinskaya, V., Kotova, N. (2010). Experimental studies of Ta_2O_5 and columbite-tantalite solubility in fluoride solutions from 300 to 550°C and 50 to 100 MPa. *Mineralogy and Petrology*, 99, 287-300. <https://doi.org/10.1007/s00710-010-0112-z>

Надійшла до редколегії 30.10.19

O. Dubyna^{1,2}, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher

E-mail: dubyna_a@ukr.net;

S. Kryvdik¹, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.

E-mail: kryvdik@ukr.net;

V. Belskyi¹, PhD (Geol.)

E-mail: belskyi_vm@ukr.net;

O. Vyshnevskiy¹, PhD (Geol.-Min.), Senior Researcher

E-mail: vyshnevskyy@i.ua;

¹M.P. Semenchenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,

34 Acad. Palladina Ave., 03680, Kyiv-142, Ukraine;

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ACCESSOR MINERALS OF RARE METALS IN THE GRORUDITES OF EASTERN AZOV (UKRAINE)

Unlike other Precambrian platforms and shields, alkaline granites and their hypabyssal and effusive varieties in Ukraine have limited distribution. In Eastern Azov region dike analogs of alkaline granites (grorudites) are known. They are different in chemical and mineral composition and considered as analogs of pantellerites (aegirine hihg-Ti) and comendites (amphibole low-Ti). The high-Ti aegirine grorudites are more intensively enriched with incompatible rare elements (REE, Zr, Nb) compared with their low-Ti varieties. Despite the high or elevated concentration of HFSE in grorudites, there are few of their own minerals in these rocks. Thus, in high-Ti grorudites there have been identified such minerals of rare elements as monazite-(Ce), bastnäsite-(Ce), britholite-like mineral and rare earth apatite, zircon and undiagnosed zirconium mineral, whereas only zircon and niobium-containing rutile are diagnosed in amphibole one. These minerals are very small in size, the largest of them can reach 15-20 μm (sometimes up to 50 μm), although most of them do not exceed 10 μm (usually 5-6 μm). It is assumed that a significant part of rare metals are isomorphically included in rock-forming minerals (alkaline pyroxenes and amphiboles), and zirconium minerals, at least part of them, are secondary and formed as result of changing of primary sodium (eudialyte, catapleite, ilerite) or calcium (gittingsite) zirconosilicates which are more typical for peralkaline (agpaitic) rocks. Taking into account the peculiarities of the mineral composition, geochemical features and rare-earth mineralization of the Azov region, there is reason to believe that the HFSE mineralization of these rocks is a consequence of the differentiation of the primary igneous silica unsaturated melt(s). Secondary hydrothermal processes are weakly manifested in the studied rocks and probably presented by replacement of primary accessory minerals. Elevated or high concentrations of Nb in high-Ti grorudites and absence of Nb-minerals may indicate that the PT-condition of differentiation of these rocks (low F concentration, high fO_2 , and hypabyssal conditions of crystallization) did not contribute to their crystallization. The presence of grorudites in this region increase the prospects of discovering small alkaline granite massifs (holocrystalline analogues of grorudites) to which deposits and/or occurrences of Nb, REE, Zr, Sn, Be can be related.

Keywords: grorudite, zirconium minerals, monazite-(Ce), bastnäsite-(Ce), britholite-like mineral, REE-apatite.

A.Дубина^{1,2}, д-р геол. наук, ст. науч. сотруд.

E-mail: dubyna_a@ukr.net;

С. Кривдик¹, д-р геол.-минералог. наук, проф.

E-mail: kryvdik@ukr.net;

В. Бельский¹, канд. геол. наук,

E-mail: belskyi_vm@ukr.net;

А. Вишнеvский¹, канд. геол.-минералог. наук, ст. науч. сотруд.

E-mail: vyshnevskyy@i.ua;

¹Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семененко НАН Украины,

пр. Акад. Палладина, 34, г. Киев, 03680, Украина;

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ В ГРОРУДИТАХ ВОСТОЧНОГО ПРИАЗОВЬЯ (УКРАИНА)

В отличие от других докембрийских платформ и щитов на территории Украины щелочные граниты и их гипабиссальные и эффузивные аналоги распространены ограниченно. В Восточном Приазовье известны дайковые аналоги щелочных гранитов (грорудиты), которые являются дискретными по химическому и минеральному составу и рассматриваются как аналоги пантеллеритов (эгириновые высокотитанистые) или комендитов (амфиболовые низкотитанистые). Высокотитанистые эгириновые грорудиты интенсивнее обогащены некогерентными редкими элементами (REE, Zr, Nb) по сравнению с их низкотитанистыми разновидностями. Несмотря на высокое или повышенное содержание HFSE в грорудитах, в этих породах мало их собственных минералов-концентраторов. Так, в первых выявлены и проанализированы такие минералы редких элементов, как монацит-(Ce), бастнезит-(Ce), бритолиитоподобный минерал и редкоземельный апатит, циркон и окончательно недиагностированный минерал циркония, тогда как в амфиболовом грорудите диагностирован только циркон и ниобийсодержащий рутил. Упомянутые минералы имеют очень мелкие размеры, самые крупные из них могут достигать 15-20 μm (иногда до 50 μm), большинство не превышает 10 μm (чаще 5-6 μm). Предполагается, что значительная часть редких металлов изоморфно входит в состав породообразующих минералов (щелочные пироксены и амфиболы), а минералы циркония, по крайней мере их часть, являются вторичными и образовались за счет первичных натриевых (эдиалит, катаплет, илерит) или кальциевых (гиттингсит) цирконосиликатов, характерных для пересыщенных щелочами (агпаитовых) пород. Учитывая петрологические особенности и характер редкоземельной минерализации грорудитов Приазовья, есть основания полагать, что HFSE минерализация этих пород является следствием дифференциации первичного ненасыщенного кремнеземом исходного магматического расплава. Вторичные гидротермальные процессы слабо проявляются в исследуемых породах и приводят, в основном, к замещению первичных акцессорных минералов. Учитывая повышенные или высокие концентрации Nb в высокотитанистых грорудитах и незначительное количество или отсутствие собственных Nb-минералов, вероятно, что физико-химические параметры дифференциации этих пород (низкая концентрация F, высокая fO_2 и гипабиссальные условия кристаллизации) не способствовали их кристаллизации. Наличие в этом регионе грорудитов расширяет перспективы выявления небольших массивов подобных щелочных гранитов (полнокристаллических аналогов грорудитов), с которыми могут быть связаны месторождения и/или проявления Nb, REE, Zr, Sn, Be.

Ключевые слова: грорудит, циркониевые минералы, монацит-(Ce), бастнезит-(Ce), бритолиитоподобный минерал, REE-апатит.

УДК 550.424.4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.06>

А. Сплодитель, канд. геогр. наук, докторант,

E-mail: asplodytel@gmail.com,Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України,
пр. Акад. Палладіна, 34, м. Київ, 03680, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА ТЕРИТОРІЇ ВІЙСЬКОВОГО ПОЛІГОНУ "ОЛЕШКІВСЬКІ ПІСКИ"

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

Наведено результати еколого-геохімічних досліджень ґрунтового та рослинного покриву територій військового полігону "Олешківські піски", проведено класифікацію хімічних елементів за класами небезпечності та їх порівняння з гранично допустимими концентраціями. Аналітичні роботи з визначення валового вмісту та рухомих форм важких металів у ґрунтах проведено методом атомної адсорбції та методом мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS), окремі визначення отримані з використанням гамма-активаційного та рентгенофлуоресцентного аналізів. Аналіз та інтерпретація коефіцієнтів концентрації сполук важких металів здійснено на ландшафтно-геохімічних засадах.

Розроблено регулярну сітку точок пробовідбору, що побудована з урахуванням ландшафтно-геохімічної структури території і забезпечує контроль за ландшафтно-геохімічними потоками та бар'єрами. Розраховано сумарний показник забруднення ґрунтового покриву полігону з урахуванням різної токсичності елементів. Він досягає максимальних значень у районі розташування вогневих позицій та котла військового полігону. Середній показник Zc поверхневого шару ґрунту становить – 32, що відповідає безпечному рівню забруднення.

Досліджено вміст рухомих форм важких металів у ґрунтовому покриві полігону з метою ідентифікації токсичних та толерантних рівнів концентрації важких металів, а також локалізації резервних джерел елементів у ґрунтах, здатних підтримувати оптимальний рівень концентрації у ґрунтовому розчині. Встановлено, що вміст важких металів у трьох рухомих формах складають наступні геохімічні асоціації: у кислотнорозчинній формі: $Mn > Zn > Pb > Cu > V > Ni > Co > Cd$; в обмінній: $Mn > Zn > Pb > V > Co = Ni > Cu > Cd$; у водорозчинній формі: $Mn > Zn > Pb = V > Co > Ni > Cd > Cu$. Наведено результати досліджень щодо інтенсивності накопичення та характеру розподілу валових та рухомих форм важких металів у ґрунтовому просторі та їх міграцію у профілі ґрунту. Виділено домінуючу техногенну геохімічну асоціацію: $Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > Ni > V > Co > Mn$. Виявлено ландшафти з максимальним поліелементним забрудненням.

Ключові слова: важкі метали, форми знаходження, сумарний показник забруднення, геохімічна асоціація, ландшафт, ландшафтно-геохімічні умови.

Постановка проблеми. В умовах інтенсивного техногенного впливу на геосистеми, зумовленого тривалим веденням військової діяльності, виникає реальна загроза забруднення всіх компонентів ландшафту важкими металами (ВМ). Хімічний вплив заходів бойової підготовки призводить до зміни природних параметрів компонентів ландшафту під дією забруднювальних речовин, що утворюються внаслідок експлуатації систем зброї та військової техніки.

Військові полігони належать до територій небезпек з погляду можливого техногенного забруднення природного середовища. Тому оцінка їхніх ландшафтно-геохімічних умов стає одним із необхідних етапів аналізу еколого-геохімічного стану.

У зв'язку з цим необхідна розробка методики комплексного вивчення, картографування та оцінки на засадах еколого-геохімічного підходу, як основи обґрунтування комплексу реабілітаційних заходів, спрямованих на відновлення територій військових полігонів, забруднених внаслідок військової діяльності, з метою приведення їх екологічного стану до гарантовано-безпечних довіллію і здоров'ю людей рівнів та стандартів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості розподілу та форми знаходження важких металів у природних середовищах досліджували М.О. Глазовська (1998), В.О. Кузнецов (1990), Ю.Ю. Саєт (1990) та ін. Геохімії важких металів присвячені праці таких українських дослідників: Б.Ф. Міцкевича (1984), Е.Я. Жовинського (2002), А.І. Самчука (1998, 2006), В.В. Доліна, І.В. Кураєвої (2002, 2006) тощо.

Об'єкти та методи досліджень. Об'єктом дослідження є ландшафтні комплекси військового полігону "Олешківські піски". Дослідження виконувалися впродовж 2015–2019 рр. у межах військового полігону "Олешківські піски", як складової частини території національного природного парку (НПП) з такою ж назвою.

Зразки ґрунту для вивчення вмісту та латерального перерозподілу важких металів відбирали з верхнього гумусного горизонту методом "конверта" по ландшафтно-

геохімічній катені. Аналітичні роботи з визначення валового вмісту та рухомих форм важких металів у ґрунтах та фітомасі рослин визначено методом атомної адсорбції на спектрометрах С-115, "Сатурн-3" та методом мас-спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-MS), аналізатор ELEMENT-2 (Німеччина), в Інституті геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семененка НАН України та Національному науковому центру "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського". Окремі визначення рухомих форм мікроелементів одержані на приладі M=3030 ("Перкін-Ельмер", США) і M=1800 ("Хітачі", Японія), а також з використанням гамма-активаційного та рентгенофлуоресцентного аналізів. Аналіз та інтерпретація коефіцієнтів концентрації сполук ВМ здійснено на ландшафтно-геохімічних засадах.

Методологія розташування сітки пробовідбору формувалася з урахуванням функціонального зонування території полігону. Основні точки відбору зразків ґрунту на глибині 0–15 см були розташовані у межах типових елементів основної функціональної зони полігону "Олешківські піски" – на позиціях для стрільби з прямою наводкою, у котлі та придорожній смузі. Для порівняння було здійснено пробовідбори у буферній зоні та у межах військового табору.

ґрунтового-геохімічне обстеження виконувалася за такими методиками: гранулометричний склад за методом піпетки в модифікації Качинського (ДСТУ 4730:2007), загальний вміст гумусу за Тюрнімом (ДСТУ 4289:2004), рН водної витяжки за (ГОСТ 26423-85), рН сольової витяжки з ґрунту за (ГОСТ 26484-85), рухомих форм ВМ, що випускаються ацетатно-амоніємним буферним розчином з рН=4,8 – за ДСТУ 4770.1:2007–4770.9:2007.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є визначення вмісту важких металів у ландшафтах військового полігону "Олешківські піски", що підлягають різному впливу військової діяльності, а також аналіз ландшафтних передумов їхньої латеральної та радіальної міграції.

Виклад основного матеріалу дослідження. Військовий полігон є стаціонарним військовим об'єктом, який

протягом значного проміжку часу перебуває та функціонує на певній території. У зв'язку з цим за прийнятою класифікацією його можна віднести до військових природно-технічних систем, які є одним із різновидів природних територіальних комплексів, що зазнали змін внаслідок військової діяльності. У системі стаціонарних військових об'єктів призначення полігону полягає у забезпеченні бойової підготовки військ, проведення тактичних навчань і табірних зборів артилерійських частин та підрозділів (Вазицький, 1989).

Процеси техногенного перетворення природних умов території військового полігону "Олешківські піски" розпочалися з 1957 р. На території Олешківської (Козачелазерської) піщаної арили знаходився військовий полігон, на якому відпрацьовували військові навчання пілоти з країн Варшавського договору. З лютого 2010 р. територія увійшла до складу заповідної зони національного природного парку "Олешківські піски". Однак, у зв'язку з окупацією Російською Федерацією Кримського півострова та східних областей, Міністерство оборони України відновило військові навчання на колишньому полігоні, що перебуває під охороною й у статусі національного природного парку.

Природні умови. Територія військового полігону "Олешківські піски" відповідно до фізико-географічного районування належить до Рибальченсько-Раденського ландшафтного району ландшафтною областю Нижньодніпровського терасово-дельтового степу Причорноморсько-Приазовського сухостепоного ландшафтного краю (Маринич та ін., 2003).

У геологічному відношенні територія знаходиться у межах північного схилу Причорноморської западини з глибиною залягання архейсько-протерозойського кристалічного фундаменту від 1200 м.

Геоморфологічною основою території є обширна акумулятивна терасова рівнина, складена антропогенною алювіально-дельтовою товщею на неогенових вапняково-мергелистих і піщано-глинистих утвореннях (Проект організації..., 2013).

Специфіка рельєфу полягає в наявності піщаних масивів алювіального походження, які розглядаються геоморфологами як перша надзаплавна (борова) тераса Дніпра. Сучасні еолові процеси сформували на її поверхні своєрідні дюни та котловини вивування. Тераса залягає на більш давніх терасах, тому її необхідно розглядати як ерозійно-акумулятивну (Сплодитель, 2016).

Потужність і літологічний склад алювіальних відкладів дуже мінливий. Так, у північно-східній частині Козачелазерської арили товща алювіальних пісків і лесоподібних суглинків становить 6–8 м. Подекуди у горизонтах суглинково-супіщаних відкладів трапляються прошарки прісноводних озерних утворень. Піщані алювіальні відклади, які залягають на поверхні, багаторазово перевідкладені еоловими процесами. У замкнених пониженнях лесоподібні суглинки видозмінені процесами оглеєння у зеленувато-сірі та оливково-сизуваті ущільнені суглинки. Піски на 88 % формуються із зерен кварцу, 2 % складають оксиди заліза (лімоніт, гематит, магнетит), зерен гранату, турмаліну, глауконіту та деяких інших мінералів. За гранулометричним складом незалісені та слабогумусовані піски належать до дрібно-середньозернистих (Сплодитель, 2016).

Завдяки дослідженням автора опрацьовано та укладено ландшафтну та ландшафтно-геохімічну карту району дослідження в масштабі 1 : 25000 (Сплодитель, 2016). Створені нами карти розподілу вмісту важких металів у сучасному ґрунтовому покриві НПП "Олешківські піски" (станом на 2015 р.), також є новою складовою досліджень території військового полігону (Кураєва та ін., 2017).

Закономірності розподілу токсичних елементів. Вміст важких металів у ґрунтовому покриві залежить від взаємодії з гуміновими кислотами, які, володіючи високою сорбційною ємністю, є потужним геохімічним бар'єром. Інтенсивність міграції речовин залежить від гранулометричного складу ґрунтів і вмісту гумусу. Концентрації забруднювальних речовин у ґрунтах, у т. ч. важких металів, визначаються, головним чином, типом ґрунтового покриву та морфологічними особливостями території, що впливають на процеси латеральної і радіальної міграції та акумуляції (Чертко, 2011).

Як свідчать дослідження, у найбільшій кількості поліюанти акумулюються у верхньому ґрунтовому горизонті, для гумусово-елювіального та елювіального горизонтів дерново-слабопідзолистих піщаних та супіщаних ґрунтів кількість забруднювальних речовин знижується у результаті процесів виносу органічних та мінеральних речовин (Sankaran and Phillip, 1990).

У котлах артилерії відбувається хімічне забруднення повітряного простору, внаслідок емісії газів вибухового перетворення боєприпасів, і ґрунтів – залишками вибухових речовин, що не розірвалися (Вазицький, 1989).

При здійсненні стрільб на території полігону використовуються боєприпаси з різним складом порошу та вибухових речовин, при горінні яких утворюються: азот, сажа, вуглеводні, свинець, двоокис марганцю та інші похідні. Так, при вибуху 115 мм осколково-фугасного боєприпасу, спорядженого гексогеном, утворюється близько 4000 л газу, який містить продукти згоряння цієї вибухової речовини. До 30 % газів розсіюється у повітрі, частина важких фракцій осідає на ґрунт (Вазицький, 1989).

Серед небезпечних речовин, що входять до складу викидів військових транспортних засобів, найбільш вивчена поведінка Pb, який вивільнюється після спалювання пального. Встановлено, що з усіх присадок, який містять Pb, близько 40 % одразу осідає на ґрунт. Відстань, на яку поширюється свинець, може досягати 130 м, а на відстані 100 м від маршрутів постійного пересування машин концентрація Pb в ґрунті перевищує фон у 5 разів. Характерною рисою Pb та інших важких металів є те, що вони зв'язуються з колоїдами, а через рослини здатні надходити до організму людини. Значне місце у забрудненні ґрунту викидами транспорту займають інші важкі метали. За даними досліджень 2019 р. на території полігону, вздовж основних шляхів пересування військової техніки, встановлено наявність у ґрунтах Cu, Zn, Cd, V тощо. У ході бойової підготовки, ґрунти полігону за один рік експлуатації накопичують: Pb – близько 816 мг/кг, оксиду азоту – близько 300 мг/кг, оксиду вуглеводу – близько 420 мг/кг. Військові транспортні засоби є одним з поширених джерел хімічного впливу на навколишнє середовище (Вазицький, 1989).

Проведені дослідження свідчать, що у ґрунтах військового полігону "Олешківські піски" погіршена структура та порушений водний режим, а пригнічення росту рослин сприяє посиленню ерозії та дефляції.

Першочерговість аналізу валової форми вмісту забруднювачів у ґрунтах полігону є виправданою, оскільки вона характеризує геоecологічний стан та потенційну небезпеку забруднення ландшафтів у разі їхнього нагромадження та зростання концентрації.

У пробах ґрунту, відібраних на території військового полігону, найвищим виявився валовий вміст свинцю. Концентрація Pb становить 18–66 мг/кг і перевищує фон та ГДК, показники яких відповідно становлять 6–8 мг/кг та 30 мг/кг. Зафіксований підвищений вміст валових форм Cu, Cd, Co, Zn. Перевищення фону практично у всіх досліджуваних зразках ґрунтів зафіксовано для Ni (вміст сягає 12–18 мг/кг) і Cu (10–25 мг/кг). Вміст цих

хімічних елементів лежить у межах ГДК, однак інколи отримані значення перевищують його і становлять 24 мг/кг та 42 мг/кг відповідно. Близькими до фонових значень є кількість у ґрунті Hg (0,01 мг/кг) та V (10 мг/кг), а в точках 15–19, 28–19 та 76–19 зафіксовано незначне перевищення їх фонових значень. Концентрація Zn є високою (у межах 6,1–73 мг/кг) і знаходиться вище фонових значень та значень ГДК (Пашенко та ін., 2003). Однак для Co характерні локальні перевищення по точках моніторингу 32–15, 102–15, 120–19, 213–19 (6,2–8,1 мг/кг).

На характер розподілу важких металів на території полігону впливає фізико-хімічний та морфологічний склад борових пісків. Встановлено, що акумуляція важких металів у рівнинно-понижених середньо-сильнозрослих борових пісках суттєво відрізняється від високогорбистих слабогумусованих слабозарослих пісків та варіює в широкому діапазоні. Урочища рівнинно-середньохвилястих середньо-сильнозрослих борових пісків є давнішими формами рельєфу, для них характерні морфологічні та хімічні ознаки осолодіння. Процеси осолодіння сприяють міграції сполук ВМ у глибину ґрунтового профілю з ґрунтовою вологою. Розвиток дернового процесу сприяє висхідному руху ВМ, який фактично відсутній на високогорбистих слабогумусованих слабозарослих борових пісках. Урочища рівнинно-середньохвилястих середньо-сильнозрослих борових пісків відрізняються слабкою диференціацією ґрунтового горизонту на генетичні горизонти та визначають відмінності в їх сорбційній здатності. Так, у рівнинно-слабохвилястих середньо-сильнозрослих борових пісках ВМ накопичуються в більшій кількості ніж у високо- та середньогорбистих слабо- і середньозарослих слабогумусованих борових пісках, відмінності можуть досягати від 1,5 раза по Zn та Co до 15,4 раза по купруму та Pb. У високогорбистих слабогумусованих слабозарослих пісках зафіксовані більш високі концентрації металів з відносно невисокою атомною масою – Ni, V та Mn.

Найнижчий вміст Zn (6,6 мг/кг) характерний для *урочищ високо- та середньобугристих рухомих борових пісків* з глибоким заляганням ґрунтових вод, складених еоловими пісками, підстеленими давньоалювіальними відкладами з пісками перевіюваними негумусованими та слабогумусованими слабо- та середньозарослими та дерновими розвиненими слабогумусованими слабозарослими піщаними ґрунтами під сухими борами (*урочища 1–5*). Максимальний вміст цього елемента (63 мг/кг) характерний для дернових слабо-розвинених піщаних ґрунтів (*урочища 1–7*), які сягають 70 % загальної площі досліджуваної території. Аналіз вмісту Zn у поверхневому горизонті досліджуваних ґрунтів дозволив встановити тенденційне підвищення його концентрації з глибиною, що пов'язано з особливостями міграції забрудника.

Вміст Hg для вирівняних ділянок тераси становить 0,4 мг/кг, які характеризуються наявністю оглиненого піску в товщі давньоалювіальних пісків та крутизною підвітряних схилів не більше 12°, плоским характером вершин та відсутністю або незначною кількістю осередків дефляції. Концентрація цього елемента не перевищує встановлені норми ГДК на жодній із точок пробовідбору.

Вміст Co в поверхневому шарі ґрунту зазвичай змінюється від 1 до 7 мг/кг. Концентрація у межах полігону становить 6,5–7,5 мг/кг. Високі показники вмісту Co у пробах ґрунтів (8,1 мг/кг), відібраних в *урочищах середньогорбистих слабо- і середньозарослих слабогумусованих борових пісків*, складених еоловими пісками з дерновими слабо-розвиненими слабо-середньозарослими піщаними та супіщаними, дерновими слабо-розвиненими глинисто-піщаними та дерновими слабо-розвиненими піщаними ґрунтами на похованих еолово-делювіальних шаруватих

відкладах (9–12). На заході території полігону в *урочищах високогорбистих слабогумусованих слабозарослих борових пісків* з дерновими слабо-розвиненими слабозарослими піщаними ґрунтами на еолових відкладах під сухими борами концентрації Co дуже малі (8) (1,7 мг/кг).

Підвищений вміст Pb зафіксований на всіх пробних площах полігону. Антропогенними джерелами потрапляння елемента в ґрунт є ремонт зразків озброєння та військової техніки. Дослідження демонструють, що навіть у незабруднених районах на 1 га поверхні у середньому потрапляє до 180 гр Pb. Період напіврозпаду Pb в ґрунті може досягати 5800–5900 років. Максимальний вміст (66 мг/кг) виявлено на позиціях для стрільби в *урочищах низькогорбистих слабогумусованих середньозарослих борових пісків* з дерновими розвиненими середньозарослими піщаними та легкосупіщаними ґрунтами на неглибоко похованих чорноземоподібних ґрунтах, підстелених еоловими відкладами під сухими та свіжими борами (13–15), незважаючи на характерні для них транзитні умови міграції.

Важливим фактором внутрішньої диференціації території дослідження є прошарки оглиненого піску у верхній товщі алювію. В умовах рівнинно-середньо та слабохвилястого рельєфу це помітно змінює умови мінерального живлення, зволоження та визначає формування *урочищ рівнинно-середньохвилястих середньо-сильнозрослих борових пісків*, складених давньоалювіальними дрібно-середньозернистими піщаними та супіщаними відкладами з оглиненними лінзами та прошарками (0,05–0,2 м) з дерновими розвиненими глибокими середньозарослими піщаними та піщано-суглинковими, дерновими розвиненими слабо-середньо та сильнозрослими легкосупіщаними ґрунтами під свіжими борами (16–19). Для цих урочищ характерні "пікові" показники вмісту плюмбуму, що становлять 92 мг/кг. На підставі результатів дослідження латерального перерозподілу Pb зазначимо, що мінімальна його концентрація зафіксована у дернових розвинених глибоких середньозарослих піщано-суглинкових ґрунтах. Їм властива нейтральна реакція ґрунтового розчину, однак валовий вміст Pb тут є в межах фону (12 мг/кг).

Найвищий рівень концентрації Ni (35 мг/кг) зафіксовано в урочищах з чорноземами легкосупіщаними поверхнево-середньо-сильносолонцюватими сильнозрослими на давньоалювіальних пісках, розміщені переважно на півночі арени під свіжими суборами (20). Інші урочища теж вирізняються підвищеним вмістом Ni у ґрунтовому покриві, найчастіше концентрація цього елемента перевищує регіональні фонові значення на кожній із точок пробовідбору (для Ni фонові значення валового вмісту становлять 15 мг/кг).

Кадмій належить до рідких розсіяних елементів, одним з найбільших періодів напіврозпаду – близько 1200 років. Джерелом потрапляння Cd в ґрунт є вихлопні гази військового транспорту. За вмістом Cd військовий полігон належить до відносно незабруднених. Середній вміст забрудника у досліджуваних ґрунтах сягає 0,15 мг/кг. Для елемента характерна міграція вниз по профілю ґрунту, і його накопичення у верхніх горизонтах може свідчити про техногенний шлях потрапляння в геосистему.

Максимальний вміст Cd (0,2–0,5 мг/кг) зафіксований для урочищ *рівнинно-слабохвилястих середньо-сильнозрослих борових пісків*, складених давньоалювіальними вапняковими глинисто-супіщаними відкладами з прошарками та лінзами легкосуглинкового матеріалу різної потужності з чорноземами супіщаними глибоко-сильносолонцюватими середньо-сильнозрослими з середньоглибоким еоловим наносом на супіщаних

давніоелювіальних глинисто-супіщаних відкладах під свіжими суборами (21).

Серед досліджуваних сполук важких металів високі показники концентрації у ґрунтах цієї території має Cu. Показники вмісту елемента в ґрунті залежать від материнських порід, однак на сучасному етапі збільшення концентрації сполук у верхньому гумусному горизонті ґрунту пов'язане з підвищеним військовим впливом. На

міграційну поведінку впливають процеси адсорбції, оклюзії, хелато- і комплексоутворення та мікробіологічної фіксації (Чертко *и др.*, 2011). Виявлено значне перевищення вмісту Cu (8 мг/кг) для дернових слабозрозвинених слабо-середньозарослих піщаних ґрунтів на похованих чорноземоподібних супіщаних ґрунтах (22–26) під свіжими борами (табл. 1).

Таблиця 1

Середній валовий вміст важких металів у ландшафтах території військового полігону "Олешківські піски", мг/кг (глибина 0–15 см) (за власними даними 2015–2019 рр.)

Хімічний елемент	Урочища високо та середньобугристих рухомих борових пісків, n=621	Урочища рівнинно-слабохвилястих та понижених середньо-сильно-зарослих борових пісків, n= 743	Середній валовий вміст ВМ в ландшафтних урочищах, n≥1300
Zn ²⁺	39,24	68,65	64,34
Pb ²⁺	28,63	52,34	44,37
Ni ²⁺	12,39	18,47	16,53
Co ²⁺	6,18	7,65	6,43
Cd ²⁺	0,18	0,29	0,21
Cu ²⁺	45,68	67,42	54,74
V ²⁺	31,18	47,11	38,86
Mn ²⁺	564,74	645,23	620,21

Концентрація Mn в ґрунтах досліджуваної території близька до середніх концентрацій його по регіону, яка сягає 640 мг/кг сухої маси.

Підвищений вміст Mn (760–820 мг/кг) характерний для знижених ділянок основної поверхні піщаної надзаплавно-терасової рівнини, що перебувають в умовах підвищеного зволоження. Тут формуються *урочища рівнинно-понижених середньо-сильнозарослих борових пісків*, які складені оглеєними давньоалювіальними дрібно-середньозернистими піщаними та супіщаними відкладами з оглиненими лінзами та прошарками (0,05–0,2 м) з дерновими слабозрозвиненими глеюватими середньозарослими глинисто-піщаними на неглибоко похованих дернових розвинених глибоких глейових легкосупіщаних ґрунтах у комплексі з дерновими розвиненими сильнозарослими супіщано-легкосуглинковими на похованих дернових розвинених середньоглибоких глеюватих піщано-глинистих ґрунтах підстелених слабооглеєними давньоалювіальними відкладами (27, 29–34) з вмістом Mn >820 мг/кг. Джерелом надходження Mn у ґрунтовий покрив полігону є ґрунотворні породи. Найвища концентрація Mn переважно у верхньому ґрунтовому горизонті, що пов'язано з його фіксацією органічними сполуками. Також підвищена концентрація Mn простежується в урочищах, які складені оглеєними давньоалювіальними дрібно-середньозернистими піщаними та супіщаними відкладами (з оглиненими лінзами та прошарками) (0,1–0,2 м) з дерновими слабозрозвиненими глеюватими слабосолончакуватими середньозарослими глинисто-піщаними ґрунтами на оглеєних давньоалювіальних відкладах під вологими борами (28).

Максимальний вміст усіх досліджуваних забруднювальних речовин характерний для знижень антропогенного походження (вирви від авіаційних бомб), які містять горизонти, збагачені оксидами та гідроксидами Fe. Вони складені переважно еоловими пісками, підстеленими оглеєними давньоалювіальними (верхньоантропогенними) відкладами, а природного походження – оглеєними давньоалювіальними дрібно-середньозернистими піщаними та супіщаними відкладами з оглиненими лінзами та прошарками (0,05–0,2 м). На дніщах таких западин формуються дернові розвинені середньоглибокі глейові середньо-сильнозарослі солончакові легкосупіщані, дернові розвинені глибокі глеюваті та глейові слабосолончакуваті середньо-сильнозарослі супіщані та дернові слабозрозви-

нені глейові слабосолончакові середньозарослі глинисто-піщані ґрунти з підвищеним вмістом Pb, V та Ni (53 мг/кг, 42 мг/кг, 21 мг/кг відповідно) (46–55).

Досягаючи більше 8–9 м висоти, високо- та середньобугристі рухомі борові піски визначають характер розподілу важких металів на території полігону. Вміст ВМ від вершини до основи бугра помітно зростає, що зумовлено безперервним механічним перенесенням частин піску з висотної частини бугра до його основи, де вони накопичуються у великій кількості. По-друге, внаслідок випадання опадів відбувається міграційний змив хімічних елементів. Потрапляючи на поверхню ґрунтового покриву, ВМ зазнають ряд перетворень і залежно від характеру геохімічних бар'єрів, властивих території, розсіюються або накопичуються. Очевидно, це слугує визначальним фактором того, що концентрації вище ГДК виявлені лише для Zn, Pb, Cu (1,8–3,1 раза), валовий вміст інших металів нижче значень їх ГДК (Пащенко *та ін.*, 2003).

Встановлено, що вміст Cu, Mn та Co в поверхневому шарі пісків полігону найбільше залежить від їх вмісту в ґрунотворних породах. Zn, незважаючи на підвищену міграційну спроможність, у пісках накопичується у значно більшій кількості порівняно з іншими сполуками ВМ. Це зумовлено його приуроченістю до досить широкого діапазону гранулометричних фракцій. Водночас Co накопичується у верхній частині ґрунтового профілю в значних кількостях завдяки своїй низькій міграційній спроможності та незначному виносу рослинами.

Таким чином, мікроелементний склад поверхневого шару борових пісків залежить від ґрунотворних порід, що є наслідком біогеохімічних процесів, що відбуваються в ґрунті, у т. ч. і під впливом рослинності.

Валова концентрація важких металів у ґрунті характеризує їх загальний запас, але не дає уявлення про їх доступність для рослин. Підхід до нормування забруднення за валовим вмістом ВМ у ґрунті слід розглядати як суто орієнтовний. Більш об'єктивну оцінку забруднення можна отримати при визначенні в ґрунті вмісту рухомих форм ВМ (Чертко, 2011). Вміст рухомих форм важких металів у ґрунті є одним з найважливіших показників, що визначаються при еколого-геохімічному моніторингу природного середовища (Sankaran and Phillip, 1990). Він впливає на інтенсивність водної міграції важких металів та їх доступність для рослин і, таким чином, характеризує потенційну небезпеку накопичення важких металів у ґрунтах.

Кількість елементів у рухомій формі визначається цілим рядом факторів. Це окисно-відновні і лужно-кислотні умови, клас водної міграції, а також сорбційна ємність ґрунтів, що залежить, у свою чергу, від мінерального складу, кількості глинистої фракції, кількості і складу органічних сполук (Sankaran and Phillip, 1990).

Дослідження вмісту рухомих форм важких металів у ґрунтовому покриві полігону здійснено з метою ідентифікації токсичних та толерантних рівнів концентрації ВМ та локалізації резервних джерел елементів у ґрунтах, здатних підтримувати оптимальний рівень концентрації у ґрунтовому розчині. Встановлено, що вміст важких металів у трьох рухомих формах становлять такі геохімічні асоціації, мг/кг: у кислотнорозчинній формі: $Mn > Zn > Pb > Cu > V > Ni > Co > Cd$; в обмінній: $Mn > Zn > Pb > V > Co = Ni > Cu > Cd$; у водорозчинній формі: $Mn > Zn > Pb = V > Co > Ni > Cd > Cu$.

Аналіз закономірностей розподілу рухомих форм металів у верхньому горизонті борових пісків полігону дозволяє зробити висновок про те, що чітко виділяється біологічне накопичення рухомих форм мангану. Досліджувані ландшафти військового полігону можна віднести до регіону з різким дефіцитом рухомих форм Pb , Cd , Cu , Co , Ni , V , Zn та підвищеним вмістом рухомого Mn . Середній сумарний вміст рухомих форм важких металів у борових пісках і їх співвідношення ілюструють матеріали табл. 2. Встановлено, що вміст рухомих форм металів у борових пісках не перевищує ГДК для ґрунтів і становить від 1,0 до 4,4 % його величини. Можна припустити, що є тісний зв'язок між вмістом рухомих форм металів із гранулометричним складом борових пісків та вмістом гумусу.

Таблиця 2

Рухомі форми важких металів у ґрунтовому покриві території військового полігону "Олешківські піски", мг/кг (n=155)

Хімічний елемент	Форма знаходження		
	Кислотнорозчинна	Обмінна	Водорозчинна
Zn^{2+}	2,21±0,18	0,65±0,07	0,09±0,007
Pb^{2+}	0,90±0,08	0,18±0,01	0,07±0,003
Ni^{2+}	0,18±0,01	0,07±0,004	0,02±0,008
Co^{2+}	0,121±0,005	0,061±0,006	0,021±0,002
Cd^{2+}	0,041±0,0023	0,008±0,0024	0,009±0,0001
Cu^{2+}	0,41±0,05	0,055±0,06	0,007±0,0003
V^{2+}	0,32±0,0018	0,07±0,004	0,06±0,004
Mn^{2+}	34,18±2,16	8,13±0,54	0,62±0,04

Однією з найважливіших форм сполук металів у ґрунтах є водорозчинна, що характеризує їх вміст у ґрунтовому розчині та визначає міграцію за профілем ґрунту та процеси транслокації у системі "ґрунт-рослина". Вивчення водорозчинних форм сполук важких металів у пісках полігону показало, що у водорозчинних формах міститься мінімальна кількість досліджених металів від валового вмісту: 0,22 % Zn ; 0,32 % Pb ; 4,21 % Cd ; 0,46 % Co ; 0,08 % Cu ; 0,09 % Ni ; 0,19 % V ; 2,14 % Mn .

Аналізуючи дані фракціонування проб дернових слабоборозвинених глеюватих слабосолончакуватих глинисто-піщаних ґрунтів, можна відзначити, що значна частина сполук важких металів зв'язана з оксидами та гідроксидами Fe . Сполуки Fe є найважливішою сорбційною системою в ґрунтах і завдяки своєму високому вмісту та здатності до утворення полімолекулярних плівок на поверхні глинистих мінералів взаємодіють з іонами металів шляхом витіснення іонів H^+ , що входять в OH -групи або шляхом заміщення іонів Fe^{3+} або Fe^{2+} , що і визначає стан багатьох важких металів у ґрунтах. Окрислізовані оксиди Fe зв'язують меншу кількість забруднювачів. Включення ВМ до складу окрислізованих оксидів Fe відбувається внаслідок дифузії іонів металів у міру формування осаду. Слід зазначити, що оксиди та гідроксиди Fe утримують у 2–6 разів більше металів, ніж органічна речовина ґрунту (Чертко і др., 2011). Для досліджуваних ґрунтів характерний невисокий вміст легкорозчинних фракцій ВМ, їх частка становить менше одного відсотка від валового вмісту та залежить в основному від кислотності ґрунтів. Поверхневий горизонт (He), збагачений органічною речовиною, є

основним акумулятором техногенного забруднення й одночасно бар'єром на шляху проникнення елементів-забруднювачів у нижні ґрунтові горизонти. Таким чином, значні кількості Cu , Ni і Co пов'язані зі сполуками Fe , які, у свою чергу, можуть переходити в рухомий стан у разі розвитку відновлювальних умов за надмірного зволоження ґрунтів.

Фоновий вміст ВМ у досліджуваних ґрунтах полігону підпорядковується загальним закономірностям розподілу, а рівень накопичення в ґрунтах, головним чином, залежить від складу ґрунтотворних порід.

Для загальної характеристики забрудненості ґрунтового покриву полігону нами розрахований показник сумарного забруднення за методикою Ю.Е. Саєта (Z_c),

$$Z_c = \sum K_{nci} - \dots (n-1),$$

де n – кількість аномальних елементів; K_{nci} – коефіцієнт перевищення над фоном (коефіцієнт концентрації).

Оцінку забруднення ґрунтів проводили, відповідно до меж значень сумарного показника: при $Z_c < 16$ – забруднення вважається допустимим; при $16 < Z_c < 32$ – помірно небезпечним; при $32 < Z_c < 128$ – небезпечним; при $Z_c > 128$ – надзвичайно небезпечним (Чертко і др., 2011).

Цей показник досягає максимальних значень у районі розташування вогневих позицій та котла військового полігону. Z_c поверхневого шару ґрунту (0–10 см), Cu , Pb , Zn , Co , V та Ni змінюється від 8 до 56, середній показник – 32, що відповідає небезпечному рівню забруднення ґрунтового покриву (табл. 3). Z_c зменшується у напрямку від вогневих позицій до буферної зони. Нами виділено техногенну геохімічну асоціацію: $Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > Ni > V > Co > Mn$.

Таблиця 3

Оцінка осередків забруднення ґрунтів Олешківського військового полігону

Функціональна зона полігону	Середній сумарний показник забруднення	Категорія забруднення
Вогневі позиції	56	Небезпечна
Котел	42	Небезпечна
Придорожня смуга	32	Небезпечна
Житлова зона	14	Допустима
Буферна зона	17	Допустимо небезпечна

Нами розрахований сумарний показник Zc з урахуванням різної токсичності елементів, представлений у роботі Ю.М. Водяницького (2011), за формулою

$$Z_{\Sigma} = \sum (K_{i,j} \times K_{T_i}) - (n-1),$$

де K_{T_i} – коефіцієнт токсичності i-го елемента.

Значення коефіцієнтів токсичності елементів представлено в табл. 4.

Таблиця 4

Коефіцієнти концентрації токсичних елементів

Клас небезпеки	Коефіцієнт токсичності	Хімічні елементи
1	1,52	Cd, Hg, Pb, Zn
2	1,03	Co, Ni, Cu
3	0,54	V, Mn

Таким чином, дослідження проведені протягом п'яти років, дозволили встановити такі результати.

Вміст Hg, Cd та Ni зафіксовано на попередньому рівні, виявлено збільшення вмісту Pb, Zn, V та Mn, що зумовлено посиленням процесів міграції ВМ вниз по ґрунтовому профілю, а також процесами ерозії та дефляції внаслідок зростання військової активності на полігоні.

У дернових розвинених слабогумусованих слабозарослих піщаних ґрунтах у 90-сантиметровому шарі міститься у 1,1 раза менше Zn, Pb та Cu, ніж у супіщаних, і у 1,8 раза менше Zn, Pb, Co, ніж у дернових розвинених середньозарослих супіщаних ґрунтах, що, на наш погляд, зумовлено тим, що у ґрунтах, утворених на давньо-алювіальних супіщаних відкладах, міститься більша кількість валового вмісту означених сполук ВМ. У дернових розвинених середньозарослих легкосупіщаних ґрунтах, сформованих на легкосуглинкових відкладах міститься більше валового вмісту Pb, Zn, Ni та Mn, порівняно з піщаними ґрунтами. Однак рухомість сполук ВМ у них залишається низькою й у верхніх горизонтах коливається від 0,4 до 1,1 %, знижуючись в елювіальних горизонтах та материнській породі до 0,1–0,3 %.

Отримані результати щодо вмісту та закономірностей розподілу ВМ дозволяють припустити, що екзогенні процеси та антропогенна діяльність впливають на первинний рівень вмісту важких металів у ґрунотворних породах, однак прямий вплив на вміст важких металів у ґрунтового покриву мають фактори ґрунтоутворення.

Висновки. Аналіз ландшафтно-геохімічних умов території є невід'ємною складовою еколого-геохімічної оцінки території. Максимальні значення токсичних елементів зафіксовані в урочищах рівнинно-слабохвилястих та понижених середньо-сильнозарослих борових пісків, що характеризують район розташування вогневих позицій військового полігону. Найбільший вміст рухомих форм у ґрунтах характерний для біофілних елементів – Mn, Zn, Cu. Відмічено перевищення Pb, Cu, Zn у фітомасі рослин порівняно з діючими ГДК.

A. Splodytel, Cand. Sci. (Geogr.), Doctoral Student,

E-mail: asplodytel@gmail.com;

M.P. Semenenko Institute of Geochemistry, Mineralogy and Ore Formation of the NAS of Ukraine,
34 Acad. Palladina Ave., Kyiv, 03680, Ukraine

Проведені дослідження виявили залежність перерозподілу важких металів від ландшафтно-геохімічної структури території полігону, що визначає характер та потенційну інтенсивність міграційних потоків забруднювачів. Це підтверджує необхідність систематичних досліджень ландшафтів полігону "Олешківські піски" з метою вдосконалення управління станом природного середовища в інтересах підвищення якості бойової підготовки.

Список використаних джерел

- Вазикий, П.Г. (1989). Очерки военной экологии. Ленинград: Воениздат.
Кураева, И.В., Соркина, Л.Ю., Сплодитель, А.О. (2017). Серия географических карт: Разподіл важких металів (Cu, Pb, V) у сучасному ґрунтового покриві (горизонт 0–5 см) Національного природного парку "Олешківські піски" та прилеглих територій" (у цифровому форматі, базовий масштаб 1 : 50 000). *Свідство про реєстрацію авторського права на твір №71505*. Державна служба інтелектуальної власності України.
Маринич, О.М., Пархоменко, Г.О., Петренко, О.М., Шищенко, П.Г. та ін. (2003). Удосконалена схема фізико-географічного районування України. *Український географічний журнал*, 1, 16–20.
Проект організації території Національного природного парку "Олешківські піски", охорони, відтворення та рекреаційного використання його природних комплексів та об'єктів (2013). Приватне акціонерне товариство "Науково-виробничий комплекс, "Курс" Київ.
Сплодитель, А.О. (2016). Географічна карта "Ландшафтні комплекси Національного природного парку "Олешківські піски" та прилеглих територій" (у цифровому форматі, базовий масштаб 1 : 25 000). *Свідство про реєстрацію авторського права на твір №69449*. Державна служба інтелектуальної власності України.
Фатеев, А.І., Пашенка, Я.В. та ін. (2003). Фононий вміст мікроелементів у ґрунтах України. Харків.
Чертко, Н.К. і др. (2011). Геохимия ландшафта. Учеб. пособие. Минск: БГУ.
Sankaran, U.K., Phillip, S. (1990). Heavy metals uptake and accumulation by *Typha angustata* from Wetlands around thermal power station. *Int. J. Ecol. and Environ. Sci.*, 16, 2–3, 13–144.

References

- Chertko, N.K. et al. (2011). *Heokhymia landshafta. Ucheb. Posobyie*. Mynsk: BHU. [in Russian]
Fatieiev, A.I., Pashchenka, Ya.V. et al. (2003). *Fonoviy vmist mikroelementiv u gruntakh Ukrainy*. Kharkiv. [in Ukrainian]
Kurayeva, I.V., Sorokina, L.L., Splodytel, A.O. (2017). *Seriia heohrafichnykh kart: Rozpodil vazhkykh metaliv (Cu, Pb, V) u suchasnomu gruntovomu pokryvi (horyzont 0-5 sm) Natsionalnoho pryrodnoho parku "Oleshkivski pisky" ta prylyehlykh terytorii"* (u tsyfrovomu formati, bazoviy masshtab 1 : 50 000). *Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №71505*. Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy. [in Ukrainian]
Marynych, O.M., Parkhomenko, H.O., Petrenko, O.M., Shyshchenko, P.H. et al. (2003). *Udoskonalena skhema fizyko-heohrafichnoho raionuvannia Ukrainy. Ukrainian Geographical Journal*, 1, 16–20. [in Ukrainian]
Proekt orhanizatsii terytorii Natsionalnoho pryrodnoho parku "Oleshkivski pisky", okhorony, vidtvorennia ta rekreatsiinoho vykorystannia yoho pryrodnykh kompleksiv ta ob'ektiv (2013). *Pryvatne aktsionerne tovarystvo "Naukovo-vyrobnychiy kompleks, "Kurs" Kyiv*. [in Ukrainian]
Sankaran, U.K., Phillip, S. (1990). *Heavy metals uptake and accumulation by Typha angustata from Wetlands around thermal power station. Int. J. Ecol. and Environ. Sci.*, 16, 2-3, 13-144.
Splodytel, A.O. (2016). *Heohrafichna karta "Landshaftni kompleksi Natsionalnoho pryrodnoho parku "Oleshkivski pisky" ta prylyehlykh terytorii"* (u tsyfrovomu formati, bazoviy masshtab 1 : 25 000). *Svidotstvo pro reiestratsiiu avtorskoho prava na tvir №69449*. Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti Ukrainy. [in Ukrainian]
Vazytskyi, P.H. (1989). *Ocherky voennoi ekolohiyi*. Leningrad: Voenizdat. [in Russian]

Надійшла до редколегії 25.09.19

HEAVY METALS DISTRIBUTION TRENDS ON "OLESHKIVSKI PISKY" MILITARY TRAINING SITE

The results of ecological-geochemical researches of soil cover of "Oleshkivski pisky" military training site, using maximum allowable concentration and classification of chemical elements with respect to hazard classes are presented. Analytical works to identify gross content and heavy metals movable forms in soils were defined by methods of atomic absorption and mass-spectrometry with inductively coupled plasma (ICP-MS) as well as by using gamma-ray activation analysis and X-ray fluorescence analysis. Analysis and interpretation of the coefficients of heavy metal components concentration were conducted based on landscape and geochemical fundamentals. The regular network of the protoselection points was developed.

This network is built taking into account landscape structure of the territory, and provides control over landscape and geochemical currents and barriers. The average index of soil cover pollution of the polygon was calculated taking into account different toxicity of the elements. This index reaches its maximum in the region of firing positions and military polygon. The average Zc index of the upper soil level is 32, which corresponds to the dangerous level of soil pollution. The research revealed the content of moveable forms of heavy metals in soil cover of the polygon in order to identify toxic and tolerant levels of heavy metals concentration and reserve sources of elements in soils, which can maintain optimal concentration level in soil solution. It was defined that content of heavy metals in three movable forms are represented in the following geochemical units, mg/kg:

in acid soluble form – $Mn > Zn > Pb > Cu > V > Ni > Co > Cd$; in exchangeable form – $Mn > Zn > Pb > V > Co = Ni > Cu > Cd$; in water soluble form – $Mn > Zn > Pb = V > Co > Ni > Cd > Cu$.

The article presents research results on accumulation intensity and the nature of distribution of gross and mobile heavy metals forms in soil and on their migration in the soil profile. The dominant technogenic geochemical unit was extracted: $Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > Ni > V > Co > Mn$. Landscapes with maximum polyelement contamination have been identified.

Keywords: heavy metals, speciation forms, summarized contamination rate, geochemical association, landscape, landscape-geochemical conditions.

А. Сплодитель, канд. геогр. наук, докторант,

Email: asplodytel@gmail.com;

Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. М.П. Семененко НАН Украины,

пр. Акад. Палладина, 34, г. Киев, 03142, Украина

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ТЕРРИТОРИИ ВОЕННОГО ПОЛИГОНА "ОЛЕШКОВСКИЕ ПЕСКИ"

Приведены результаты эколого-геохимических исследований почвенного и растительного покровов территории военного полигона "Олешковские пески", проведена классификация химических элементов по классам опасности и их сравнение с предельно допустимыми концентрациями. Аналитические работы по определению валового содержания и подвижных форм тяжелых металлов в почвах проведены методом атомной адсорбции и методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS), а также с использованием гамма-активационного и рентгенофлуоресцентного анализов. Интерпретация коэффициентов концентрации соединений тяжелых металлов осуществлена на принципах ландшафтно-геохимического анализа.

Созданная регулярная сетка точек пробоотбора, построенная с учетом ландшафтной структуры территории, обеспечивает контроль за ландшафтно-геохимическими потоками и барьерами. Рассчитан суммарный показатель загрязнения почвенного покрова полигона с учетом различной токсичности элементов. Он достигает максимального значения в районе расположения огневых позиций и котла военного полигона. Средний показатель Z_c поверхностного слоя почвы составляет - 32, что соответствует опасному уровню загрязнения.

Исследовано содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвенном покрове полигона с целью идентификации токсичных и толерантных уровней концентрации тяжелых металлов и локализации резервных источников элементов в почвах, способных поддерживать оптимальный уровень концентрации в почвенном растворе. Установлено, что содержание тяжелых металлов в трех подвижных формах составляют следующие геохимические ассоциации: в кислоторастворимой форме: $Mn > Zn > Pb > Cu > V > Ni > Co > Cd$; в обменной: $Mn > Zn > Pb > V > Co = Ni > Cu > Cd$; в водорастворимой: $Mn > Zn > Pb = V > Co > Ni > Cd > Cu$.

Приведены результаты исследований по интенсивности накопления и характеру распределения валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвенном покрове, их миграции в профиле почвы. Установлены ландшафты с максимальным полиэлементным загрязнением. Выделено доминирующую техногенную геохимическую ассоциацию: $Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > Ni > V > Co > Mn$.

Ключевые слова: тяжелые металлы, формы нахождения, суммарный показатель загрязнения, геохимическая ассоциация, ландшафт, ландшафтно-геохимические условия.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.07>

С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: vitus16@ukr.net;
І. Онищук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
Email: oivan1@ukr.net;
М. Рева, канд. фіз.-мат. наук, доц.,
E-mail: mvreva@gmail.com;
О. Шабатура, канд. геол. наук,
E-mail: dard@ukr.net;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ЕЛЕКТРИЧНІ Й АКУСТИЧНІ ПАРАМЕТРИ НИЖНЬОПЕРМСЬКИХ КАРБОНАТНИХ ПОРІД ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ГЛИНСЬКО-СОЛОХІВСЬКОГО ГАЗОНАФТОНОСНОГО РАЙОНУ ДДЗ

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

Присвячено вивченню електричних й акустичних параметрів нижньопермських карбонатних порід західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району Дніпровсько-Донецької западини.

Установлено, що в атмосферних умовах значення питомого електричного опору сухих екстрагованих вапняків (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється від 111,953 кОм·м до 12,147 МОм·м (середнє 1,542 МОм·м). У разі насичення гасом вапняки мають діапазон зміни питомого електричного опору від 44,478 кОм·м до 14,449 МОм·м (середнє значення 1,435 МОм·м). Отже, середні значення електричних опорів сухих порід і насичених гасом практично не відрізняються, у зв'язку з високими опорами наповнювачів. Питомий електричний опір вапняків, насичених моделлю пластової води (мінералізація $M=190$ г/л), змінюється від 1,11 Ом·м до 23,16 Ом·м (середнє 3,12 Ом·м).

Лабораторними дослідженнями встановлено, що в атмосферних умовах варіація відносного електричного опору вапняків знаходиться в межах від 13,5 до 228,5 (середнє 32,5).

Електрометричні дослідження зразків вапняків у змодельованих пластових умовах (температура $t=50^{\circ}\text{C}$, тиск $p=30$ МПа, мінералізація насичувального розчину $M=190$ г/л) показали, що питомий електричний опір порід у цих умовах загалом змінюється від 0,81 Ом·м до 13,19 Ом·м (середнє 2,67 Ом·м). Вивчена залежність питомого опору порід від тиску. Внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску. Регресійний зв'язок коефіцієнта збільшення питомого електричного опору з тиском для досліджених порід виражається лінійною функцією.

На основі досліджень відносного електричного опору і пористості порід у пластових умовах встановлено, що відносний електричний опір вапняків змінюється від 17,3 до 271,9 (середнє 50,7), а відповідні зміни коефіцієнта пористості становлять від 0,040 до 0,169 (середнє 0,118). Кореляційний зв'язок цих параметрів має лінійний вид.

Лабораторними вимірюваннями відносної діелектричної проникності вапняків визначено, що її величина для сухих зразків змінюється від 3,0 до 7,5 (середнє 4,2), а для насичених гасом – від 2,8 до 8,8 (середнє значення 4,5). Отже, результати досліджень свідчать, що діелектрична проникність сухих порід і насичених гасом практично не відрізняється. У разі насичення вапняків моделлю пластової води (розчином NaCl) вона стрімко зростає – від сотень до тисяч разів (у середньому в 944 рази) і її значення змінюються від 655 до 9565 (середнє 4280). Стрімке зростання даного параметра пов'язане з високою провідністю моделі пластових вод і, як наслідок, досить високою їх діелектричною проникністю.

Лабораторні акустичні дослідження швидкостей поширення поздовжніх і поперечних хвиль у породах, насичених розчином NaCl, показали, що швидкість поздовжніх хвиль варіює в межах від 3346 м/с до 4388 м/с (середнє 4030 м/с), а швидкість поперечних хвиль – від 1753 м/с до 2121 м/с (середнє 1942 м/с). У разі насичення вапняків гасом швидкість поздовжніх хвиль змінюється несуттєво, порівняно зі зразками, насиченими розчином NaCl, її діапазон зміни становить від 3433 м/с до 4514 м/с (середнє 4011 м/с). Швидкість поперечних хвиль у цьому разі зростає в середньому в 1,2 рази й варіює в межах від 2137 м/с до 2464 м/с (середнє 2344 м/с).

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних та акустичних досліджень порід дозволив установити кореляційні зв'язки між фільтраційно-ємнісними, електричними й пружними параметрами досліджених вапняків.

Ключові слова: питомий електричний опір, відносний електричний опір, відносна діелектрична проникність, швидкість пружних хвиль, вапняки.

Постановка проблеми. У результаті виконаних останнім часом досліджень установлено, що північно-західна частина Дніпровсько-Донецької Западини (ДДЗ) є одним із найперспективніших районів на наявність нетрадиційних покладів вуглеводнів (сланцевий газ, газ ущільнених порід, сланцева нафта), які можуть у разі перевищувати ресурси традиційного типу (Михайлов та ін., 2014^{1,2}). У межах західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ значно поширені нижньопермські карбонатні породи, які є перспективними на вуглеводні. Зазначені породи представлені слабодоломітизованими вапняками з малопотужними прошарками піщанистих або алевропіщанистих вапняків. Характеристика петрофізичних властивостей цих порід (у т. ч. електричних параметрів) є одним із важливих засобів оцінки нафтогазового потенціалу перспективних товщ як традиційних, так і нетрадиційних колекторів, що зумовлює актуальність їх петрофізичного вивчення.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Вивченню фізичних властивостей порід газонафтоперспективних районів України присвячений ряд публікацій (Вижва та ін., 2010, 2012, 2013, 2014, 2017, 2018, 2019; Vyzhva, 2017; Карпенко та ін., 2014; Маслов та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014^{1,2}; Нестеренко, 2010; Орлюк, 2013; Орлюк, 2018; Садівник, 2013; Федорішин, 2018 та ін.). Слід відзначити, що електричні параметри порід мають важливе значення для оцінки їх колекторських властивостей за даними свердловинних електрометричних досліджень. При цьому петрофізичні характеристики порід і їх кореляційні зв'язки з фільтраційно-ємнісними параметрами мають досить виражений індивідуальний характер щодо кожної ділянки досліджень. Тому результати вивчення цих властивостей та встановлення відповідних кореляційних зв'язків у межах кожної перспективної площі потребують окремого публічного висвітлення.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми. Актуальність пошуків і вивчення традиційних і нетрадиційних (сланцевий газ, сланцева нафта, газ ущільнених колекторів та ін.) джерел вуглеводнів на сучасному етапі є очевидною. Для оцінки перспективності на вуглеводні геологічних структур і комплексів, окрім геолого-геофізичних та економічних параметрів, вмісту органічної речовини й ступеня її термічної переробки, важливе значення мають також петрофізичні властивості гірських порід. Вони використовуються для оцінки колекторських властивостей порід за даними свердловинних електрометричних та акустичних досліджень пошуково-розвідувальних свердловин. Слід відзначити, що петрофізичні дослідження до недавнього часу були спрямовані переважно на вивчення порід-колекторів традиційних джерел нафти й газу. Водночас петрофізичні (зокрема, електричні й акустичні) параметри порід-колекторів нетрадиційних джерел вуглеводнів на сьогодні є маловивченими або зовсім невивченими. Незважаючи на велику кількість публікацій, для ряду порід-колекторів практично відсутні дані результатів їх лабораторних електрометричних та акустичних досліджень і їхні кореляційні залежності з фільтраційно-ємнісними параметрами.

Мета досліджень. Оцінка перспективності відкладів на вуглеводні виконується через визначення електричних та акустичних властивостей окремих типів і груп порід та встановлення кореляційних зв'язків із фільтраційно-ємнісними параметрами. Матеріали про зміни питомого електричного опору й швидкості пружних хвиль порід, отримані під час лабораторних досліджень, використовуються для інтерпретації результатів електрометричних та акустичних методів досліджень свердловин, польової електророзвідки й сейсморозвідки. Метою досліджень, результати яких аналізуються у статті, є вивчення електричних та акустичних параметрів перспективних на джерела вуглеводнів нижньопермських карбонатних порід на території західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ.

Експериментальні дослідження. Виконаний комплекс петрофізичних досліджень у НДЛ Теоретичної та прикладної геофізики ННІ "Інститут геології" КНУ імені Тараса Шевченка включав визначення: густини порід; відкритості та ефективної пористості; структури капілярного простору; питомого електричного опору; швидкості пружних хвиль в атмосферних і пластових умовах. Виконано також петрографічні дослідження.

У даній статті наведено результати комплексних електрометричних і акустичних досліджень властивостей колекції із 79 зразків нижньопермських відкладів західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ (вапняків в інтервалі глибин 1765–1900 м).

Коротка петрографічна характеристика. Нижньопермські досліджувані породи належать до мікритових, спаритових, мікрито-спаритових і доломітизованих піщаних вапняків. Структура теригенного матеріалу різноманітна, окремі зерна досягають грубого псамітового розміру, а присутній у вапняках пелітоморфний кварц є невід'ємною складовою мікритових різновидів (у т. ч. і у спаритах), де він асоціює з глинистою (сметитовою) складовою. Головною ознакою вказаних порід є забарвлення окремих шарів та прошарків, яке контролюється вмістом у них сметитової складової зеленуватого кольору. Виділяються сірі, іноді злегка буруваті спарити, зеленувато-сірі мікрито-спарити, зелені мікрити та світло-сірі їх різновиди. Для шарів і прошарків характерні непаралельні, хвилясті, хмароподібні й лінзоподібні їх

межі. Зустрічаються прошарки, збагачені піщаним матеріалом із сульфідною мінералізацією.

Досліджені породи мають міжзернові, часто несполучані між собою, пори розміром 0,01–0,03 мм. Їх внутрішня поверхня й контури підпорядковані граням незрощуваних між собою ромбоєдрів. Слабка проникність різних вапняків зумовлена наявністю павутинної системи міжзернових тріщин, дуже часто заповнених аморфною глинистою колоїдогенною речовиною, або тектонічних тріщин, частково виповнених перевідкладеним мікритом чи кірками кальциту.

Петрографічні особливості порід дозволяють зробити припущення, що формування карбонатних відкладів відбувалося в середньоглибинній частині шельфу, де осідав планктон, про що свідчать біоморфні рештки, які складають основу перекристалізованих спаритових та мікрито-спаритових різновидів. У зону формування тонкозернистих біоморфних карбонатних осадів періодично надходив теригенний несортований матеріал (можливо шторміти) або осади, перенесені придонними течіями, які привносили в більш глибоководні ділянки разом з теригенним матеріалом фрагменти слабо консолидованих (можливо водоростями) сметитових кірочок. Осади мають трансгресивний характер: знизу вгору по розрізу спостерігається зменшення потужності та кількості теригенних прошарків. В осадах наявні текстури опливання, що формувалися всередині пластів за рахунок неоднорідного літостатичного тиску на діагенетичній стадії після формування кристалів і мікроконкрецій сульфідів. Присутня доломітизація порід має вибірковий характер: більш інтенсивна – по біоморфних рештках, мінімальна – по кальцитовому мікриту. Вірогідно, що доломітизація вапняків відбувалася на епігенетичній стадії після (або під час) формування кліважної тріщинуватості. Проте додаткова пористість не утворювалась, у зв'язку із заліковуванням пор і тріщин сметитом і пелітоморфним карбонатом.

Методика електрометричних та акустичних досліджень. Лабораторні електрометричні вимірювання сухих зразків керна виконані за температури 20° С цифровим тераомметром С.А 6547, який дозволяє виконувати високоточні вимірювання електричного опору на постійному струмі за двохелектродною схемою в діапазоні від 10 кОм до 10 МОм із цифровим записом результатів вимірювань на ЕОМ за спеціальною програмою (*Вижва та ін., 2010, 2012, 2013, 2014, 2017; Vyzhva, 2017*). Для вимірювання зразків, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl, мінералізація 170 г/л), застосовувався RCL-метр МНС-1100. Циліндричні зразки під час вимірювання розташовувались у спеціальному кернотримачі, розробленому в НДЛ Теоретичної та прикладної геофізики. За результатами контрольних вимірювань на еталонах і зразках було встановлено, що відносна похибка не перевищує 3,6 %.

Розв'язання задач інверсії даних сейсморозвідки й акустичного каротажу у фільтраційно-ємнісні параметри неможливе без надійної прив'язки цих даних до петрофізичних характеристик. Для лабораторних вимірювань швидкості поширення пружних хвиль у гірських породах застосовано імпульсно-фазовий ультразвуковий метод (*Продайвода, 2000, 2007*). Лабораторні акустичні дослідження виконані за допомогою установки "Керн-4", розробленої в НДЛ Теоретичної та прикладної геофізики та співробітниками механіко-математичного факультету. Вимірювання швидкості пружних хвиль здійснювалося на спеціально виготовлених лабораторних зразках, орієнтованих уздовж нашарування. Відносна похибка значень швидкості пружних хвиль не перевищила 2 %.

З метою визначення залежності петрофізичних параметрів від водонасичення порід, а отже і їх нафтогазонасичення, досліджені зміни питомого електричного опору та швидкості пружних хвиль за різного ступеня відгонки води на центрифугі ОС-6М (Породы..., 1985; Рудько, 2005). У процесі цих досліджень виконана серія вимірювань електричного опору та 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 0,03 до 1,078 МПа (7 циклів вимірювань). Паралельно визначалися також коефіцієнти водонасичення.

Для встановлення кореляційного зв'язку між електричними параметрами порід в атмосферних і пластових

умовах виконаний відповідний комплекс лабораторних петрофізичних досліджень у змодельованих пластових умовах – при температурі $t=50^{\circ}\text{C}$, тиску $p=30\text{ МПа}$ і мінералізації насичувального розчину $M=190\text{ г/л}$.

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

Аналіз даних електрометричних досліджень. У результаті виконаних лабораторних електрометричних вимірювань визначено електричні параметри нижньопермських карбонатних відкладів західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ, дані про межі змін та середні значення яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Межі змін і середні значення електричних параметрів нижньопермських карбонатних відкладів

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови			Пластові умови	
		Питомий електричний опір, Ом·м			відносний електричний опір, Р	відносний електричний опір, Р _{пл}
		сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl		
Вапняки: мікритові, спаритові, мікрито-спаритові, доломітизовані піщанисті	мін.	111953	44478	1,11	13,5	0,81
	макс.	12146665	14449461	23,16	228,5	13,90
	сер.	1542135	1434737	3,12	32,7	2,67

Лабораторними вимірюваннями в атмосферних умовах встановлено, що питомий електричний опір сухих екстрагованих зразків (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється від 111,953 кОм·м до 12,147 МОм·м за середнього значення 1,542 МОм·м. Вапняки, насичені газом, мають діапазон зміни питомого електричного опору від 44,478 кОм·м до 14,449 МОм·м (середнє значення 1,435 МОм·м). Варто відмітити, що за середніми значеннями опорів, породи насичені повітрям і газом практично не відрізняються у зв'язку з високими опорами наповнювачів.

Питомий електричний опір зразків порід, насичених моделлю пластової рідини (розчин NaCl), змінюється від 1,11 Ом·м до 23,16 Ом·м за середнього значення 3,12 Ом·м.

У результаті лабораторних досліджень визначено також відносний електричний опір порід (Р) – відношення питомого опору повністю насиченої породи ($\rho_{\text{пв}}$) до питомого опору насичувального розчину ($\rho_{\text{в}}$): $P = \rho_{\text{пв}} / \rho_{\text{в}}$ (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009). Аналіз отриманих даних дозволив установити, що відносний електричний опір вапняків змінюється від 13,5 до 228,5 за середнього

значення 32,5. Відповідний до цього діапазон зміни коефіцієнта пористості складає від 0,045 до 0,181 за середнього значення 0,127.

За даними лабораторних вимірювань побудована кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п}}$) і відносним електричним опором (Р), яка має вигляд $P = a \cdot k_{\text{п}}^{-m}$, де a – постійний коефіцієнт, m – структурний показник (рівняння Арчі–Дахнова (Дахнов, 1975; Туаб і Доналдсон, 2009)). (рис. 1). Для досліджених порід коефіцієнт $a = 0,3778$, а структурний показник $m = 2,02$ (рис. 1).

Важливою інформаційною характеристикою при петрофізичних дослідженнях гірських порід є параметр збільшення електричного опору ($P_{\text{н}}$), який являє собою відношення питомого опору частково водонасичених порід ($\rho_{\text{нв}}$) до питомого опору повністю водонасичених порід ($\rho_{\text{пв}}$): $P_{\text{н}} = \rho_{\text{нв}} / \rho_{\text{пв}}$. У процесі експериментальних лабораторних досліджень на центрифугі ОС-6М і статистичного аналізу даних електрометричних вимірювань була отримана кореляційна залежність параметра $P_{\text{н}}$ від коефіцієнта водонасичення ($k_{\text{в}}$), яка має вигляд наведеного вище рівняння Арчі–Дахнова і для досліджених порід записується у вигляді: $P_{\text{н}} = 1,1609 \cdot k_{\text{в}}^{-1,937}$ (рис. 2).

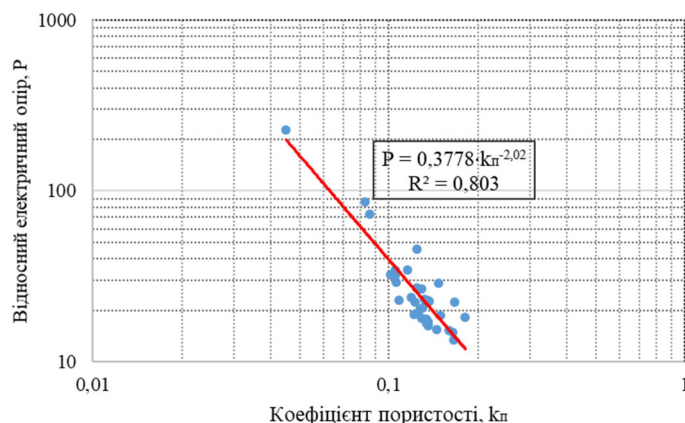


Рис. 1. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{\text{п}}$) та відносним електричним опором (Р) вапняків

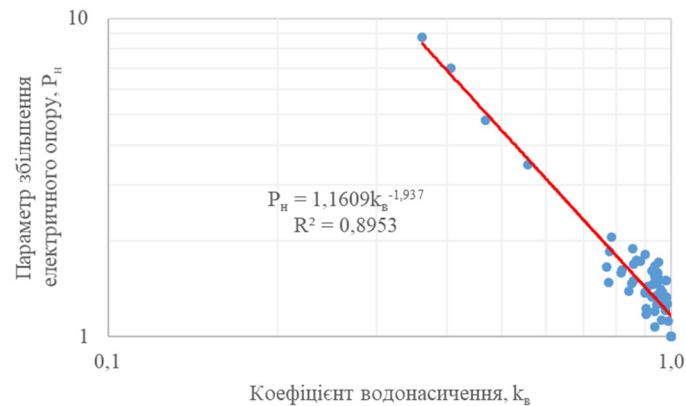


Рис. 2. Кореляційна залежність між параметром збільшення електричного опору (P_n) та коефіцієнтом водонасичення (k_b)

З метою оцінки питомого й відносного електричного опорів порід у пластових умовах виконані комплексні дослідження на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 при зміні тиску від атмосферного до 30 МПа. Вимірювання виконувались на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін і середні значення питомого й відносного електричного опорів порід у пластових умовах (температура $t=50^\circ\text{C}$, тиск $p=30\text{ МПа}$, мінералізація насичувального розчину $M=190\text{ г/л}$) наведені в табл. 1. За результатами фізичного моделювання встановлено, що питомий електричний опір порід у пластових умовах змінюється від 0,81 Ом·м до 13,90 Ом·м за середнього значення 2,67 Ом·м.

Вимірювання електричних параметрів порід при різних тисках показало, що їх питомий електричний опір із збільшенням тиску зростає, що пояснюється закриттям мікротріщин у породах та деформацією в них порового простору.

Виконаними дослідженнями визначено відносний електричний опір порід у пластових умовах. Аналіз отриманих даних дозволив установити, що відносний електричний опір вапняків у пластових умовах змінюється в діапазоні від 17,3 до 271,9 при середньому значенні 50,7, а відповідний діапазон зміни коефіцієнта пористості сягає від 0,040 до 0,169 при середньому значенні 0,118.

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних вимірювань дозволив отримати для досліджених вапняків кореляційні зв'язки між питомими електричними опорами в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах (рис. 3), між відносними електричними опорами в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах (рис. 4) та між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) у пластових умовах (рис. 5). Залежності між питомими та відносними електричними опорами в атмосферних і пластових умовах для досліджених порід виражаються лінійними функціями (рис. 3, 4).

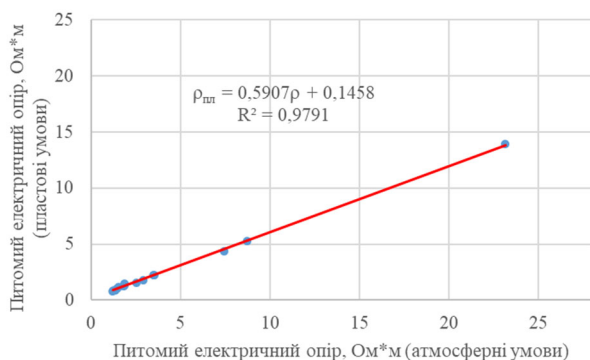


Рис. 3. Кореляційна залежність між питомим електричним опором вапняків в атмосферних (ρ) і пластових ($\rho_{пл}$) умовах

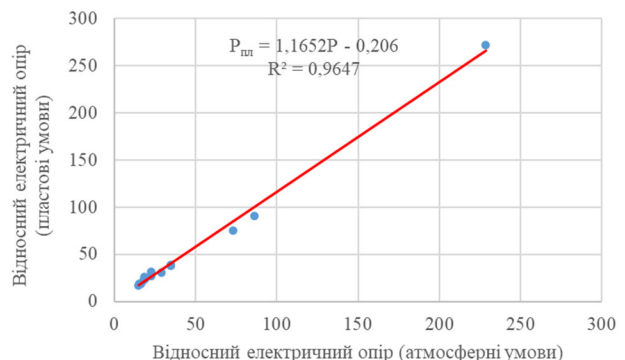


Рис. 4. Кореляційна залежність між відносним електричним опором вапняків в атмосферних (P) і пластових ($P_{пл}$) умовах

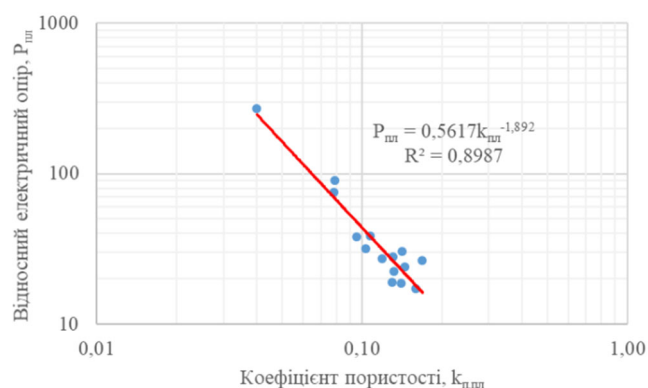


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($k_{п,пл}$) й відносним електричним опором ($P_{пл}$) вапняків (пластові умови)

Отримані кореляційні залежності, наведені на рисунках 3–5, дозволяють оцінювати відповідні параметри порід, що знаходяться в пластових умовах, за результатами лабораторного визначення цих параметрів в атмосферних умовах.

У результаті лабораторних електрометричних досліджень відносної діелектричної проникності порід (ϵ) на частоті 1000 Гц для досліджених вапняків визначені межі

зміни цього параметра. Аналіз отриманих даних свідчить, що діелектрична проникність сухих екстрагованих зразків змінюється від 3,0 до 7,5 при середньому значенні 4,2. Діелектрична проникність порід, насичених газом, варіює в межах від 2,8 до 8,8 при середньому значенні 4,5, а насичених моделлю пластової води (розчином NaCl) – у межах від 655 до 9565 при середньому значенні 4280 (табл. 2).

Таблиця 2

Межі змін і середні значення відносної діелектричної проникності порід

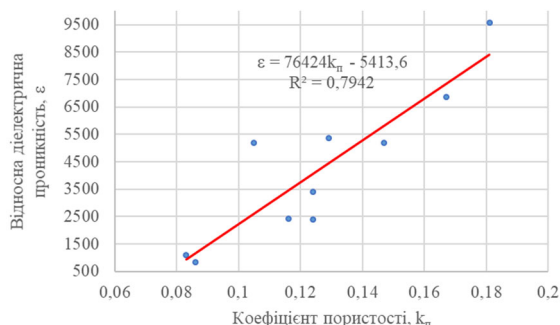
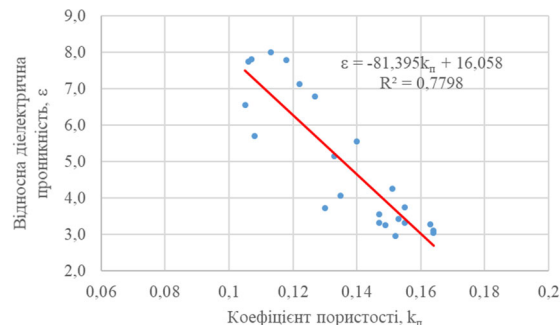
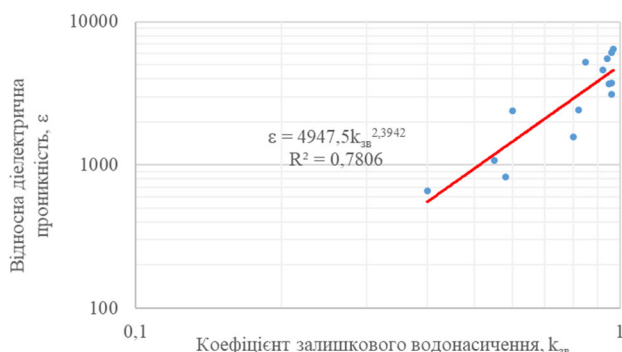
Породи	Значення параметра	Відносна діелектрична проникність (ϵ)		
		сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl
Вапняки: мікритові, спаритові, мікрито-спаритові, доломітизовані піщанисті	мін.	3,0	2,8	655
	макс.	7,5	8,0	9565
	сер.	4,2	4,5	4280

Слід відзначити, що відносна діелектрична проникність сухих порід і насичених газом ($\epsilon=2$) практично не відрізняється (табл. 2). Це пояснюється відносно малою відмінністю діелектричної проникності газу від повітря, оскільки вони є діелектриками. У результаті при заповненні незначного об'єму пор породи повітрям чи газом діелектрична проникність породи в цілому буде відрізнятися не суттєво, оскільки цей параметр буде визначатися переважно діелектричною проникністю самого скелета породи. Інша картина спостерігається при насиченні порід розчином NaCl (моделлю пластової води), діелектрична проникність якого значна. У цьому разі відносна діелектрична проникність вапняків, пори яких насичені розчином NaCl, різко зростає – від сотень до тисяч разів (у середньому у 944 рази).

Аналіз даних лабораторних електрометричних досліджень дозволив отримати ряд кореляційних залежностей між відносною діелектричною проникністю досліджених порід, насичених розчином NaCl та газом, і фільтраційно-ємнісними параметрами.

Залежності відносної діелектричної проникності від коефіцієнта пористості для різного характеру насичення зразків (рис. 6, 7) описуються лінійними функціями, при цьому у разі насичення вапняків розчином NaCl ця залежність пряма, а при насиченні газом – обернена. Це пояснюється тим, що при насиченні породи розчином NaCl збільшення її пористості призводить до збільшення кількості розчину в породи, діелектрична проникність якого суттєво вища за діелектричну проникність самої породи. У разі насичення породи газом збільшення пористості призводить до збільшення вмісту діелектрика в породи з меншою діелектричною проникністю порівняно із самою породою, у результаті чого спостерігається обернена кореляційна залежність $\epsilon=f(k_p)$.

У результаті аналізу отриманих даних установлені кореляційні залежності відносної діелектричної проникності від коефіцієнта залишкового водонасичення та нафтонасичення (рис. 8, 9), а також менш тісна кореляційна залежність відносної діелектричної проникності від коефіцієнта проникності (рис. 10). Отримані залежності описуються степеневими функціями.

Рис. 6. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) й відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених розчином NaClРис. 7. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_p) й відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених газомРис. 8. Кореляційна залежність між коефіцієнтом залишкового водонасичення ($k_{зв}$) і відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених розчином NaClРис. 9. Кореляційна залежність між коефіцієнтом залишкового нафтонасичення ($k_{зн}$) і відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених газом

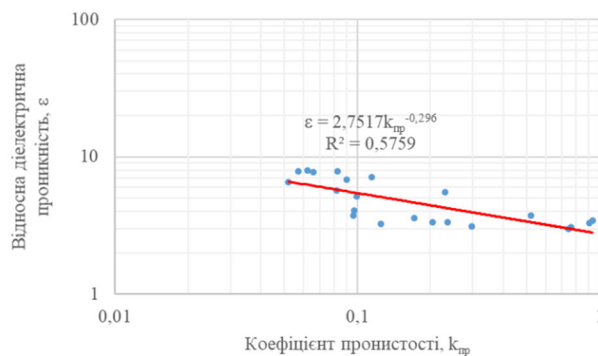


Рис. 10. Кореляційна залежність між коефіцієнтом проникності ($k_{пр}$) й відносною діелектричною проникністю (ϵ) вапняків, насичених газом

Аналіз даних акустичних досліджень. Під час лабораторних петрофізичних досліджень в атмосферних і змодельованих пластових умовах проведений комплекс акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль у карбонатних відкладах західної частини Глинсько-Солохівського газонафтоносного району ДДЗ. В атмосферних умовах вимірювалися швидкості поширення

поздовжніх і поперечних хвиль у сухих і насичених моделлю пластової води (розчином NaCl) та газом зразках. Акустичні дослідження в пластових умовах включали вимірювання швидкостей поширення поздовжніх хвиль у насичених розчином NaCl зразках. Результати зазначених акустичних досліджень наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Межі змін і середні значення швидкостей пружних хвиль досліджених порід

Породи	Значення параметра	Атмосферні умови						Пластові умови
		Швидкість поздовжніх хвиль, м/с			Швидкість поперечних хвиль, м/с			Швидкість поздовжніх хвиль, м/с
		сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl	сухих	насичених газом	насичених розчином NaCl	
Вапняки: мікритові, спаритові, мікріто-спаритові, доломітизовані піщанисті	мін.	2702	3433	3346	1878	2137	1753	3830
	макс.	4857	4514	4388	2533	2464	2121	5073
	сер.	3510	4011	4030	2229	2344	1942	4428

Аналіз результатів лабораторних акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль у породах, насичених моделлю пластової води (розчин NaCl), показав, що в атмосферних умовах швидкість поздовжніх хвиль змінюється від 3346 м/с до 4388 м/с при середньому значенні 4030 м/с, а швидкість поперечних хвиль – від 1753 м/с до 2121 м/с при середньому значенні 1942 м/с. У разі насичення вапняків газом швидкість поздовжніх хвиль варіює від 3433 м/с до 4514 м/с при середньому значенні 4011 м/с, а швидкість поперечних хвиль – від 2137 м/с до 2464 м/с при середньому значенні 2344 м/с.

У сухих зразках в атмосферних умовах швидкість поздовжніх хвиль змінюється від 2702 м/с до 4857 м/с при середньому значенні 3510 м/с, а поперечних – від 1878 м/с до 2533 м/с при середньому значенні 2229 м/с.

За результатами сейсмоакустичних досліджень в атмосферних умовах встановлено ряд кореляційних залежностей між швидкостями пружних хвиль і пористістю та

густиною досліджених порід, насичених розчином NaCl, які наводяться на рис. 11–14.

Важливою інформаційною характеристикою при петрофізичних дослідженнях гірських порід є параметр зміни швидкості поздовжніх хвиль (k_v), який являє собою відношення швидкості пружних хвиль частково водонасичених порід ($V_{p,нв}$) до швидкості пружних хвиль повністю водонасичених порід ($V_{p,пв}$): $k_v = V_{p,нв}/V_{p,пв}$. З метою встановлення кореляційного зв'язку між швидкістю поздовжніх хвиль і водонасиченням карбонатних відкладів виконана серія акустичних вимірювань швидкості поздовжніх хвиль на зразках з різним ступенем насиченості їх моделлю пластової води (розчином NaCl). Зміна водонасичення порід забезпечувалася центрифугуванням насичених розчином зразків на центрифугі ОС-6М. У результаті цих досліджень побудована кореляційна залежність (рис. 15) між коефіцієнтом водонасичення (k_b) і параметром зміни швидкості поздовжніх хвиль (k_v). Ця залежність має лінійний характер.

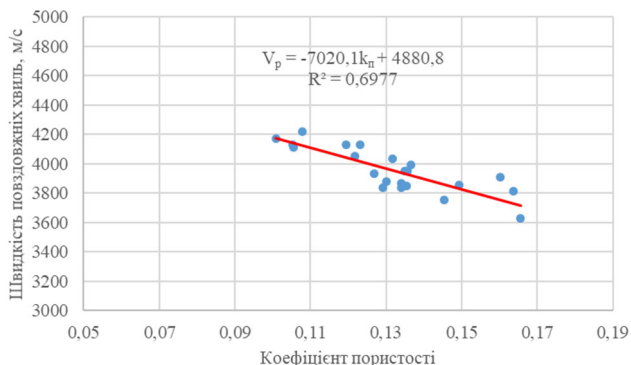


Рис. 11. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

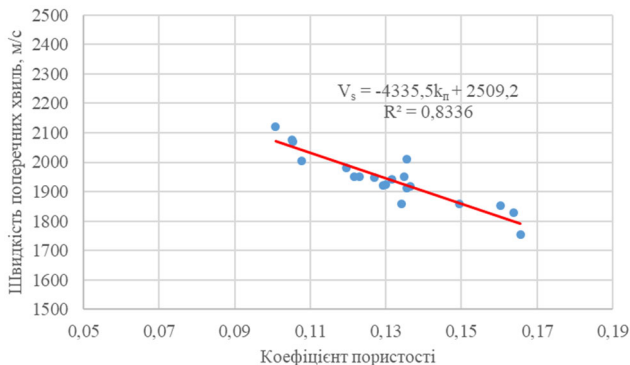


Рис. 12. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості (k_n) і швидкістю поперечних хвиль (V_s)

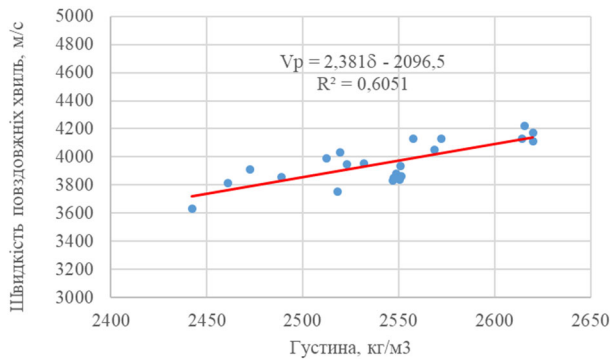


Рис. 13. Кореляційна залежність між густиною порід (δ) і швидкістю поздовжніх хвиль (V_p)

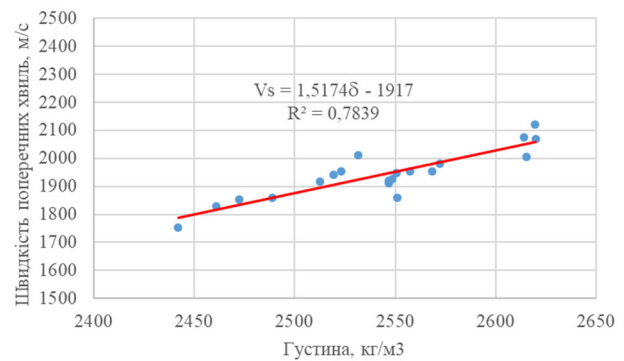


Рис. 14. Кореляційна залежність між густиною порід (δ) і швидкістю поперечних хвиль (V_s)

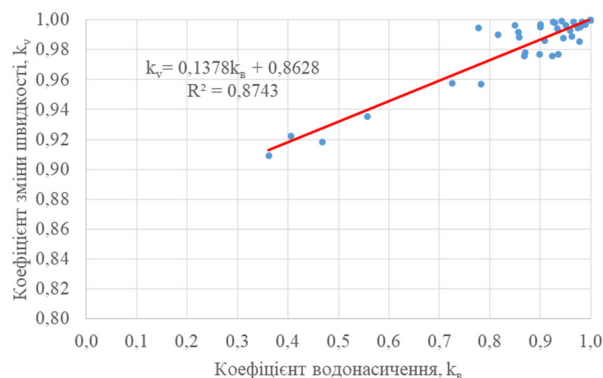


Рис. 15. Кореляційна залежність між коефіцієнтом водонасичення (K_w) і параметром зміни швидкості поздовжніх хвиль (k_v)

Акустичні дослідження швидкості поширення поздовжніх хвиль у пластових умовах $V_{p,пл}$ проведені на спеціальній установці високого тиску ВСЦ-1000 при зміні тиску від атмосферного до 30 МПа. Вимірювання виконувалися на зразках, насичених розчином NaCl. Межі змін та середні значення $V_{p,пл}$ порід у пластових умовах наведені в таблиці 3. За результатами лабораторних акустичних вимірювань під час фізичного моделювання пластових умов встановлено, що швидкість поздовжніх хвиль у карбонатних породах зростає із збільшенням тиску, внаслідок закриття в них мікротріщин та деформації

порового простору, і загалом змінюється від 3830 м/с до 5073 м/с за середнього значення 4428 м/с. Кореляційна залежність зростання швидкості поздовжніх хвиль від тиску описується поліномом 2 порядку.

Комплексний аналіз даних лабораторних акустичних досліджень дозволив отримати для досліджених вапняків кореляційні зв'язки між швидкостями поздовжніх хвиль в атмосферних і пластових умовах (рис. 16) та між коефіцієнтом пористості ($K_{п,пл}$) й швидкістю пружних хвиль ($V_{p,пл}$) у пластових умовах (рис. 17), які виражаються лінійними функціями.

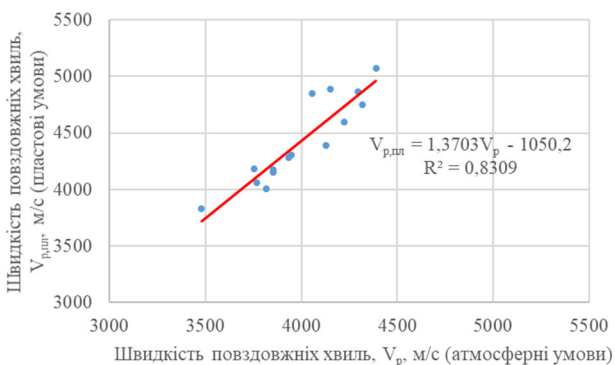


Рис. 16. Кореляційна залежність між швидкістю поздовжніх хвиль вапняків в атмосферних (V_p) і пластових ($V_{p,пл}$) умовах

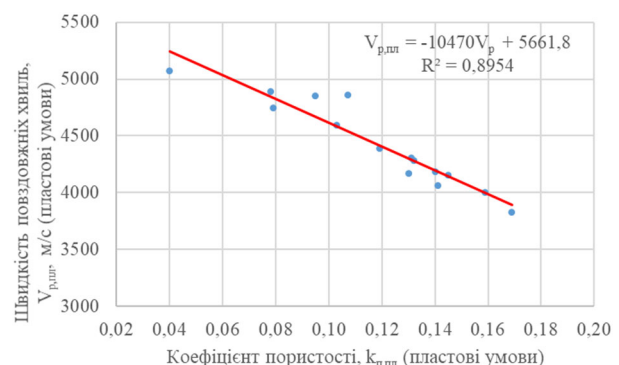


Рис. 17. Кореляційна залежність між коефіцієнтом пористості ($K_{п,пл}$) й швидкістю поздовжніх хвиль ($V_{p,пл}$) вапняків (пластові умови)

Висновки. Досліджені породи нижньопермського віку належать до мікритових, спаритових, мікрито-спаритових та доломітизованих піщаних вапняків. Вони мають міжзернові, часто несполучувані між собою пори розміром 0,01–0,03 мм. Мала проникність цих вапняків пов'язується з наявністю павутинної системи міжзернових тріщин, часто заповнених колоїдогенною аморфною глинистою

речовиною, або тектонічних тріщин частково виповнених перевідкладеним мікритом чи кірками кальциту.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань в атмосферних умовах встановлено, що значення питомого електричного опору сухих екстрагованих зразків порід (питомий електричний опір мінерального скелета) змінюється від 111,953 кОм·м до 12,147 МОм·м

(середнє значення 1,542 МОм·м). При цьому спостерігаються значні варіації питомого опору зразків, що пояснюється неоднорідностями в текстурі порід (нааявністю глинистих і піщаних прошарків та їх невпорядкованістю). Питомий електричний опір порід, насичених моделлю пластової рідини (розчином NaCl), змінюється від 1,11 Ом·м до 23,16 Ом·м (середнє 3,12 Ом·м), а насичених гасом – від 44,478 кОм·м до 14,449 МОм·м (середнє значення 1,435 МОм·м). Варто відмітити, що за середніми значеннями опорів породи, насичені повітрям і гасом, практично не відрізняються.

Петрофізичними дослідженнями визначено відносний електричний опір порід в атмосферних умовах. Отримані дані показали, що відносний електричний опір вапняків варіює в межах від 13,5 до 228,5 (середнє 32,5) за відповідної зміни коефіцієнта пористості від 0,045 до 0,181 (середнє 0,127).

На основі проведених досліджень залежності параметра збільшення електричного опору від коефіцієнта водонасичення встановлений відповідний кореляційний зв'язок, який виражається степеневою функцією.

Фізичне моделювання пластових умов дозволило встановити, що у цих умовах питомий електричний опір вапняків змінюється в межах від 0,81 Ом·м до 13,90 Ом·м (середнє 2,67 Ом·м). Вимірювання питомого опору порід при різних тисках показали, що внаслідок закриття мікротріщин та деформації порового простору електричний опір порід зростає із збільшенням тиску, при цьому залежність коефіцієнта збільшення питомого електричного опору від тиску для досліджених порід виражається поліномом 2 порядку.

Дослідженнями відносного електричного опору порід у пластових умовах встановлено, що цей параметр змінюється від 17,3 до 271,9 (середнє 51,7). Відповідний діапазон зміни коефіцієнта пористості складає від 0,040 до 0,169 (середнє 0,118).

На основі комплексного аналізу матеріалів електрометричних досліджень для вапняків встановлені кореляційні зв'язки 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 знаходяться в пластових умовах.

За результатами лабораторних електрометричних вимірювань відносної діелектричної проникності в атмосферних умовах на частоті 1000 Гц встановлено, що значення діелектричної проникності сухих екстрагованих зразків вапняків (діелектрична проникність мінерального скелета) змінюється від 3,0 до 7,5 (середнє значення 4,2). Діелектрична проникність вапняків, насичених моделлю пластової рідини (розчином NaCl), варіює від 655 до 9565 (середнє 4280), а насичених гасом – від 2,8 до 8,8 (середнє значення 4,5). За діапазоном змін і середніми значеннями діелектричної проникності породи, насичені повітрям і гасом, практично не відрізняються, що пояснюється відносно малою контрастністю діелектричної проникності діелектриків, що заповнюють пори порід, якими є повітря й гас. Відносна діелектрична проникність вапняків, пори яких насичені розчином NaCl, різко зростає – від сотень до тисяч разів (у середньому в 944 рази), що пояснюється високою провідністю насичувальної рідини й отже високими значеннями її діелектричної проникності.

Комплексний аналіз даних лабораторних електрометричних досліджень дозволив отримати ряд кореляційних

залежностей між відносною діелектричною проникністю і рядом фільтраційно-ємнісних параметрів – коефіцієнтами пористості, проникності, залишкового водо- та нафтонасичення.

Лабораторними акустичними дослідженнями в атмосферних умовах встановлено, що швидкість поширення поздовжніх хвиль у вапняках, насичених моделлю пластової води, змінюється від 3346 м/с до 4388 м/с (середнє 4030 м/с), а швидкість поперечних хвиль – від 1753 м/с до 2121 м/с (середнє 1942 м/с). У вапняках, насичених гасом, швидкість поздовжніх хвиль варіює в межах від 3433 м/с до 4514 м/с (середнє 4011 м/с), а швидкість поперечних хвиль – у межах від 2137 м/с до 2464 м/с (середнє 2344 м/с). В сухих вапняках швидкість поздовжніх хвиль має діапазон зміни від 2702 м/с до 4857 м/с (середнє 3510 м/с), а поперечних – від 1878 м/с до 2533 м/с (середнє 2229 м/с).

Проведені дослідження залежності параметра зміни швидкості поздовжніх хвиль від коефіцієнта водонасичення дозволили отримати кореляційний зв'язок між ними лінійного виду.

Фізичним моделюванням пластових умов встановлено, що в цих умовах швидкість поздовжніх хвиль вапняків змінюється від 3830 м/с до 5073 м/с (середнє 4428 м/с). Із збільшенням тиску швидкість поздовжніх хвиль зростає, унаслідок закриття мікротріщин і деформації порового простору. Залежність збільшення швидкості від тиску описується поліномом 2 порядку.

У результаті комплексного аналізу матеріалів акустичних досліджень для вапняків встановлені кореляційні зв'язки: між швидкостями пружних хвиль і густиною та коефіцієнтом пористості в атмосферних умовах; між коефіцієнтом водонасичення й параметром зміни швидкості поздовжніх хвиль; 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 акустичних параметрів, отриманих під час лабораторних вимірювань в атмосферних умовах, до параметрів порід, що знаходяться в пластових умовах.

Отримані за результатами петрофізичних лабораторних досліджень кореляційні зв'язки електричних й акустичних параметрів із фільтраційно-ємнісними властивостями вапняків можуть бути основою для попередньої інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин у разі відсутності спеціалізованих петрофізичних досліджень на нових перспективних площах.

Автори висловлюють щире подяку ст. лаборанту В.С. Цуману та студентці О.О. Красніковій за їх активну й високопрофесійну участь в експериментальних дослідженнях.

Список використаних джерел

- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2013). Петрофізичні параметри нетрадиційних порід-колекторів Південного нафтогазового регіону. *Геоінформатика*, 3 (47), 1–9.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Електричні параметри порід-колекторів імпактних структур. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 65, 31–35.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онишук, Д.І., Онишук, І.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геофизический журнал*, 36, 1, 145–157.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Петрофізичні параметри порід візейського ярусу Лохвицької зони Дніпровсько-Донецької западини. *Геофизический журнал*, 41, 4, 145–160.
- Вижва, С.А., Онишук, В.І., Онишук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 83, 30–37.

- Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В., Шабатура, О.В. (2019). Електричні параметри порід верхнього карбону Руновщинської площі ДДЗ. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 85, 37–45.
- Вижва, С.А., Онищук, Д.І., Онищук, В.І. (2012). Петроелектрична модель порід-колекторів Західно-Шебелинського газоконденсатного родовища. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 57, 13–16.
- Вижва, С.А., Онищук, І.І. та ін. (2017). Комплексні аналітичні лабораторні дослідження кернів із свердловин Руновщинської ділянки. *Науково-технічний звіт*. Корпорація "Науковий парк Київський університет імені Тараса Шевченка".
- Вижва, С.А., Рева, М.В., Гожик, А.П., Онищук, В.І., Онищук, І.І. (2010). Петроелектричні дослідження кернів складнопобудованих порід-колекторів. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 50, 4–7.
- Вижва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І. (2017). Петрофізические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79, 12–20.
- Дахнов, В.Н. (1975). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения пород. М.: Недра.
- Карпенко, О.М., Михайлов, В.А., Карпенко, І.О. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 68, 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. Геологія*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13>.
- Михайлов В.А., Куровець І.М., Синьковський Ю.Н. та ін. (2014²). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон. Кн. III. К.: "Київський університет".
- Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Загнітко, В.М. та ін. (2014¹). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. Кн. IV. К.: ВПЦ "Київський університет".
- Нестеренко, М.Ю. (2010). Петрофізичні основи обґрунтування флюїдонасичення порід-колекторів. УкрДГРІ.
- Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2013). Физические параметры пород осадочного чехла северо-западной части Днепровско-Донецкой впадины. *Геотехнический журнал*, 35, 2, 127–136.
- Породы горные. (1985). Методы определения коллекторских свойств. Метод определения коэффициента абсолютной газопроницаемости при стационарной и нестационарной фильтрации: ГОСТ 26450.2-85. Москва: Мингео СССР.
- Продайвода, Г.Т. (2007). Математичне моделювання ефективних термопружних властивостей багатокомпонентного тріщинуватого геологічного середовища насиченого флюїдом з внутрішнім тиском. *Геотехнический журнал*, 3, 122–130.
- Рудько, Г.І., Нестеренко М.Ю. та ін. (2005). Обґрунтування кондіційних значень фільтраційно-ємнісних параметрів терригенних порід-колекторів для підрахунку запасів вуглеводнів. Методичні вказівки. Київ-Львів.
- 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, (електронна публікація).
- Тиаб, Д., Дональдсон, Э.Ч. (2009). Петрофізика: теория и практика изучения коллекторских свойств горных пород и движения пластовых флюидов. М.: "Премииум Инжиниринг".
- Федоришин, Д.Д., Пятковська, І.О., Трубенко, О.М., Федоришин, С.Д., Трубенко, А.О. (2018). Удосконалення методик виділення порід-колекторів складнопобудованих геологічних розрізів з використанням математичної статистики. *XVII Міжнародна конференція "Геоінформатика: теоретичні та прикладні аспекти"*, Київ, Україна, (електронна публікація).
- 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>
- Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36, 5, 394–405.
- Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, D.I. (2017). Electrical model of Cambrian rocks from Volodymyrska area in Volyno-Podillia (Ukraine). *Nafta-Gaz : Rok LXXIII*, 2, 90–96. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03
- Reference**
- Dakhnov, V.N. (1975). Geophysical methods for the determination of reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Fedorshyn, D. D., Piatkovska, I. O., Trubenko, O. N., Fedorshyn, S. D. (2018). Improved methods of allocation reservoir rock from complex constructed geological sections by using mathematical statistics. *17th International Conference on Geoinformatics "Theoretical and Applied Aspects"*, Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]
- Karpenko, O., Mykhailov, V., Karpenko, I. (2015). Eastern Dnieper-Donets depression: Predicting and developing hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 68, 49–54. [in Ukrainian]
- Maslov, B., Onyshchuk, I., Shynkarenko, A. (2017). Modelling of nonlinear viscoelastic properties of terrigenous-calcareous sandstones. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77, 99–105. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.13> [in Ukrainian]
- Mykhailov, V.A., Kurovets, I.M., Synkovskyy, Ju.N. et al. (2014²). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine: South oil and gas region. Book III. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagnitko, V.M. et al. (2014¹). Unconventional sources of hydrocarbons in Ukraine. Eastern oil-gas-bearing region: Analytical investigations. Book IV. Kyiv: Kyiv University Publishing. [in Ukrainian]
- Nesterenko, M.Yu. (2010). Petrophysical basis of the substantiating of fluid saturation of reservoir rocks. Kyiv: UkrDHR. [in Ukrainian]
- Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2013). Physical parameters of rocks sedimentary cover of the northwestern part of the Dnieper-Donets 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>
- Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36, 5, 394–405.
- Prodaivoda, 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.
- 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]
- 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. 2th Edition. Moscow: Premium Engineering. [in Russian]
- 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., 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., 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, I. et al. (2017). Complex analytical laboratory researches of core samples of Runovshchynska area wells. *Science report*. Science Park Taras Shevchenko University of Kyiv. [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-Donets Basin). *Geophysical Journal*, 41, 2, 145–160. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, N., Shabatura O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 83, 30–37. [in Ukrainian]
- Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, N., Shabatura O. (2019). Electrical parameters of the upper carbon rocks (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 85, 37–45. [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-Donets depression promising for shale gas. *Geofizicheskii 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*, 2, 90–96. DOI: 10.18668/NG.2017.02.03
- Vyzhva, S.A., Reva, N.V., Hozhyk, A.P., Onyshchuk, V.I., & Onyshchuk, I.I. (2010). Petroelectrical investigations of borehole core of complexly-build reservoir rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 50, 4–7. [in Ukrainian]

S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
V. Onyshchuk, PhD (Geol.), Assoc. Prof.
E-mail: vitus16@ukr.net;
I. Onyshchuk, PhD (Geol.), Senior Researcher
E-mail: oivan1@ukr.net;
M. Reva, PhD (Phys.-Math.), Assoc. Prof.
E-mail: mvreva@gmail.com;
O. Shabatura, PhD (Geol.)
E-mail: dard@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ELECTRICAL AND ACOUSTIC PARAMETERS OF LOWER PERMIAN CARBONATE ROCKS (WESTERN PART OF THE HLYNSKO-SOLOKHIVSKYI OF GAS-OIL-BEARING DISTRICT OF THE DNIEPER-DONETS BASIN)

The main objective of this article is to study electrical parameters of Lower Permian carbonate rocks of Western part of the Hlynsko-Solokhivskyi gas-oil-bearing district of the Dnieper-Donets Basin (DDB) in normal (atmospheric) and modeling (reservoir) conditions.

In atmospheric conditions it has been revealed that the resistivity of dry extracted limestones (the specific electrical resistivity of framework of grains was measured) varies from 12.147 k Ω -m to 111.953 M Ω -m (mean 1.542 M Ω -m). The resistivity of saturated limestone samples with kerosene varies from 44.478 k Ω -m to 14.449 M Ω -m (mean 1.435 M Ω -m). The resistivity of dry and saturated with kerosene samples is almost the same. The resistivity of limestones saturated with model of reservoir water (salinity $M = 190$ g/l) is lower and varies from 1.11 Ω -m to 23.16 Ω -m (mean 3.12 Ω -m).

It has been determined that formation resistivity factor of limestones in atmospheric conditions varies from 13.5 to 230 Ω -m (mean 32.5 Ω -m).

In addition to resistivity, the parameter of relative permittivity of investigated limestones was studied. It was determined that relative permittivity of dry limestones varies from 3.0 to 7.5 (mean 4.2). Relative permittivity saturated samples of limestones with kerosene varies from 2.8 to 8.8 (mean 4.5) and practically does not differ from dry ones but significantly lower than values of samples saturated with model of reservoir water (from 655 to 9565, mean 4280). That means when pores of limestones are saturated with NaCl solution their relative permittivity increases rapidly – from hundreds to thousands times (on average 944 times). It can be explained by the high conductivity of model of reservoir water.

Limestones saturated with NaCl solution have velocities of P-waves in the range from 3346 m/s to 4388 m/s (mean 4030 m/s), and velocities of S-waves – from 1753 m/s to 2121 m/s (average 1942 m/s). If rocks are saturated with kerosene then velocities have strictly higher values – P-waves from 3433 m/s to 4514 m/s (mean 4011 m/s) and S-waves – from 2137 m/s to 2464 m/s (average 2344 m/s).

Physical modelling of reservoir conditions (temperature 50 °C, pressure 30 MPa) showed that the specific electrical resistivity varies from 0.81 Ω -m to 13.19 Ω -m (mean 2.67 Ω -m), and limestones – from 0.49 Ω -m to 7.81 Ω -m (mean 1.95 Ω -m). Also, "specific electrical resistivity – pressure" connection was investigated. Due to the closure of microcracks and the deformation of the pore space, the electrical resistance of rocks increases with increase of pressure. The regression dependence of the formation resistivity enlargement factor with pressure for the studied rocks has a linear character.

It was determined that in reservoir conditions the range of the formation resistivity factor for limestones varied from 17.3 to 271.9 Ω -m (mean 50.7 Ω -m), and range of variation of porosity coefficient was from 0.040 to 0.169 Ω -m (mean 0.118 Ω -m).

The comprehensive analysis of petrophysical data has been resulted in a set of correlation ratios between reservoir, electric and elastic parameters of studied limestones in normal and modeling conditions.

Keywords: specific electrical resistivity, formation resistivity factor, relative permittivity, velocities of elastic waves, correlation ratio, limestone, physical modelling of reservoir conditions.

С. Выжва, д-р геол. наук, проф.
E-mail: vsa@univ.net.ua;
В. Онищук, канд. геол. наук, доц.
E-mail: vitus16@ukr.net;
И. Онищук, канд. геол. наук, ст. науч. сотруд.
E-mail: oivan1@ukr.net;
Н. Рева, канд. физ.-мат. наук, доц.
E-mail: mvreva@gmail.com;
А. Шабатура, канд. геол. наук
E-mail: dard@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ЕЛЕКТРИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ НИЖНЕПЕРМСКИХ КАРБОНАТНЫХ ПОРОД ГЛИНСКО-СОЛОХОВСКОГО ГАЗОНЕФТЕНОСНОГО РАЙОНА ДДЗ

Статья посвящена изучению электрических параметров нижнепермских карбонатных пород западной части Глинско-Солоховского газонефтеносного района Днепровско-Донецкой впадины.

В атмосферных условиях установлено, что значение удельного электрического сопротивления сухих экстрагированных известняков (удельное электрическое сопротивление минерального скелета) изменяется от 111,953 кОм-м до 12,147 МОм-м (среднее 1,542 МОм-м). При насыщении керосином известняки имеют диапазон изменения удельного электрического сопротивления от 44,478 кОм-м до 14,449 МОм-м (среднее значение 1,435 МОм-м). Электрическое сопротивление сухих пород и насыщенных керосином практически не отличается. Удельное электрическое сопротивление известняков, насыщенных моделью пластовой воды (минерализация $M=190$ г/л), изменяется от 1,11 Ом-м до 23,16 Ом-м (среднее 3,12 Ом-м).

Лабораторными исследованиями установлено, что в атмосферных условиях относительное электрическое сопротивление известняков изменяется от 13,5 до 228,5 (среднее 32,5).

Выполненное физическое моделирование пластовых условий (температура $t=50$ °C; давление $p=30$ МПа) показало, что удельное электрическое сопротивление пород в целом изменяется от 0,81 Ом-м до 13,19 Ом-м (среднее 2,67 Ом-м). Исследована зависимость удельного сопротивления пород от давления. Вследствие закрытия микротрещин и деформации порового пространства электрическое сопротивление пород растет с увеличением давления. Регрессионная связь коэффициента увеличения удельного электрического сопротивления с давлением для исследованных пород выражается линейной функцией.

В результате исследований определены относительное электрическое сопротивление и пористость пород в пластовых условиях. Установлено, что в пластовых условиях относительное электрическое сопротивление известняков изменяется от 17,3 до 271,9 (среднее 50,7), а соответствующий этому диапазон изменения коэффициента пористости составляет от 0,040 до 0,169 (среднее 0,118).

Кроме электрического сопротивления изучен параметр относительной диэлектрической проницаемости исследованных известняков. Определено, что значение относительной диэлектрической проницаемости сухих известняков изменяется от 3,0 до 7,5 (среднее 4,2). При насыщении керосином известняки имеют диапазон изменения относительной диэлектрической проницаемости от 2,8 до 8,8 (среднее значение 4,5). Диэлектрическая проницаемость сухих пород и насыщенных керосином практически не отличается. Относительная диэлектрическая проницаемость известняков, насыщенных моделью пластовой воды изменяется от 655 до 9565 (среднее 4280). Диэлектрическая проницаемость известняков, поры которых насыщены раствором NaCl, резко возрастает – от сотен до тысяч раз (в среднем в 944 раза), что объясняется высокой проводимостью модели пластовых вод.

Скорость продольных волн в породах, насыщенных раствором NaCl изменяется от 3346 м/с до 4388 м/с (среднее 4030 м/с), а скорость поперечных волн – от 1753 м/с до 2121 м/с (среднее 1942 м/с). При насыщении известняков керосином скорость продольных волн изменяется от 3433 м/с до 4514 м/с (среднее 4011 м/с), а скорость поперечных волн – от 2137 м/с до 2464 м/с (среднее 2344 м/с).

Комплексный анализ данных лабораторных электрометрических и акустических исследований пород позволил установить корреляционные связи между фильтрационно-емкостными, электрическими и упругими параметрами исследованных известняков.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление, относительное электрическое сопротивление, относительная диэлектрическая проницаемость, скорость упругих волн, известняки.

УДК 550.552.53.553

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.08>О. Карпенко¹, д-р геол. наук, проф.,E-mail: karpenko.geol@gmail.com;В. Михайлов¹, д-р геол. наук, проф.,E-mail: vladvam@gmail.com;І. Карпенко², канд. геол. наук,E-mail: sharanskiy@gmail.com;¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;²Національна акціонерна Компанія "Нафтогаз України"

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РЕСУРСІВ ГАЗУ НЕТРАДИЦІЙНИХ КОЛЕКТОРІВ ЗА ДАНИМИ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СВЕРДЛОВИН

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

Розглянуто можливості оцінки ресурсної бази сланцевого газу та газу ущільнених колекторів з використанням даних геофізичних досліджень свердловин на прикладі типового газоконденсатного родовища південної прибортової частини Дніпровсько-Донецької западини. Особливістю подібних робіт на даному етапі вивчення перспектив нетрадиційних ресурсів вуглеводнів в Україні є дефіцит фактичного матеріалу щодо спеціальних геохімічних досліджень керну з перспективних ділянок розрізів свердловин. Основний наголос зроблено на застосування даних стандартного комплексу методів промислової геофізики. З використанням методики К. Пассі оцінено вміст органічного вуглецю у межах інтервалів пробурених свердловин. При інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин (ГДС) були враховані особливості літологічного складу гірських порід, газонасиченість пластів-колекторів традиційного типу. В умовах відсутності наявних кернових даних щодо термальної зрілості порід у межах виявлених перспективних товщ виконано оцінку ресурсів газу за декількома сценаріями. Наведено особливості інтерпретації даних ГДС при пошуках у розрізах свердловин газонасичених порід з ємнісними характеристиками, нижчими за граничні. Слід використовувати залежності типу коефіцієнта пористості – коефіцієнта проникності, коефіцієнта пористості – коефіцієнта залишкової водонасиченості для встановлення нижньої межі пористості та газонасиченості для ущільнених колекторів. Наведено рекомендації щодо розрахунків ресурсів газу, що міститься в колекторах нетрадиційного типу.

Ключові слова: ресурси газу, нетрадиційний колектор, газоконденсатне родовище, сланцевий газ, ущільнений колектор, геофізичні дослідження свердловин.

Постановка проблеми. Практично на кожному родовищі вуглеводнів існують певні додаткові видобувні ресурси, які пов'язані з так званими нетрадиційними колекторами. Це, як відомо, газ або нафта сланцегазових товщ, ущільнених порід-колекторів і метан вугільних басейнів. Перспективи відкриття родовищ або покладів сланцевого газу у Східному нафтогазоносному регіоні України вже не викликає сумнівів, у той же час обсяг досліджень у цьому напрямку є вкрай недостатній (Загнітко та Михайлов, 2014; Зеленко та ін., 2017; Карпенко, 2017, 2018; Лукин, 2011; Михайлов та Ємець, 2014; Михайлов та ін., 2014¹; Вакарчук та ін., 2013, 2014; Лукин, 2011). Щодо реалізації видобутку газу з ущільнених порід-колекторів в Україні така практика вже існує, причому припливи газу можуть скласти основну частину отриманої вуглеводневої продукції на родовищі (як приклад – Семиренківське та Мачуське газоконденсатні родовища). Це питання висвітлено в чисельних публікаціях (Карпенко, 2015; Вакарчук та ін., 2014; Полівцев, 2008; Рибалка та Карпенко, 2016).

Технології виявлення таких газо/нафтонасичених порід у розрізах свердловин за даними геолого-геофізичних досліджень достатньо добре відпрацьовані та застосовуються в першу чергу на родовищах сланцевого газу (Passey et al., 1990, 2006; Карпенко та ін., 2014^{1,2}). У той же час, коли в геологічному розрізі відсутні типові (за прикладом відомих "класичних" родовищ сланцевого газу США) сланцегазові товщі потужністю в сотні і більше метрів, виявлення перспективних об'єктів суттєво ускладнюється. У першу чергу це зумовлено недосконалістю методик інтерпретації даних ГДС, спрямованих на визначення вмісту органічного вуглецю (ТОС) та інших характеристик гірських порід, в яких може вміщуватись в значних кількостях згенерований газ або нафта, якщо їх літолого-петрофізичні характеристики відрізняються від еталонних сланцегазових товщ. Те ж саме стосується й виявлення та діагностики ущільнених порід-колекторів, визначення вмісту в них природного газу (Полівцев, 2008). Таким чином, ознайомлення з практикою подібних досліджень на

родовищах нафти і газу в Україні буде корисним для фахівців: геологів і геофізиків нафтогазового профілю.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методики оцінки петрофізичних характеристик гірських порід, які вміщують сланцевий газ або є потенційно нафтогазо-материнськими за даними геофізичних досліджень свердловин, розробляються майже три останні десятиліття (Carpenter and Alain-Yves, 1992; Fertl and Chillingar, 1988; Passey et al., 1990, 2006; Карпенко та ін., 2014¹). Аналіз можливостей різних методик щодо оцінки вмісту ТОС у гірських породах свідчить, що універсальних підходів тут немає. Одні методики орієнтовані на використання одного геофізичного параметра (наприклад, потужності експозиційної дози гамма-випромінювання в методі ГК) і застосовують рівняння регресії, адаптоване для конкретних фізико-геологічних або фаціальних умов. Інші базуються на використанні рівнянь регресії, до складу яких входять геофізичні параметри, отримані за допомогою декількох методів, наприклад, густина, гамма-випромінювання, позірний електричний опір і таке інше. Цілком зрозуміло, що ефективність їх застосування визначається певними фаціальними умовами та геофізичними параметрами для яких розроблялись стохастичні інтерпретаційні моделі.

На даний час оцінка вмісту органічного вуглецю можлива з використанням різних методик, які засновані на використанні даних ГДС. Найбільш популярною є методика Квіна Пассі ΔR_{Log} , яка базується на комплексному використанні геофізичних параметрів (Passey et al., 1990, 2006). Її перевага перед іншими – у певній універсальності; вона добре себе зарекомендувала при діагностиці сланцегазових товщ відомих крупних родовищ (Marcellus, Haynesville, Eagle Ford, Bakken, Woodford, Fayetteville, Barnett, Antrim та ін.). Проте, як було підкреслено авторами методики та досліджено у свій час нами, визначення ТОС може вміщувати суттєві похибки внаслідок неврахування вмісту природного газу в класичних колекторах, впливу літології та структури порового простору малоглинистих піщано-алевритових порід, щільних

карбонатних прошарків. Тобто застосування цієї методики повинно супроводжуватись аналізом геологічної ситуації та втручанням за потреби геофізика-інтерпретатора.

Як альтернативу було розроблено методику, яка базувалась на використанні системи з трьох петрофізичних інтерпретаційних рівнянь для неелектричних параметрів методів досліджень свердловин (Карпенко та ін., 2014¹). Методика добре себе зарекомендувала при дослідженні розрізів свердловин у ДДЗ, представлених породами різного літологічного складу, генезису та характеру насичення.

Діагностика розрізів свердловин на предмет виявлення товщ, збагачених органічною речовиною та наявністю ущільнених газонасичених колекторів, за даними ГДС є першим етапом процедури оцінки ресурсної бази нетрадиційних джерел вуглеводнів. Власне, сама методика оцінки запасів чи ресурсів достатньо висвітлена у літературі (Михайлов та ін., 2014²; Вакарчук та ін., 2014). Існує інструкція ДКЗ України у вигляді методичних вказівок з оцінки ресурсів газу сланцевих товщ (Затверджено протоколом № 625 ДКЗ України від 29.12.2012 р.).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Невирішеним залишається питання щодо надійної/достовірної прогнозовної оцінки ресурсів нетрадиційних скупчень нафти і газу в умовах звичайних розрізів нафтогазових родовищ без наявності характерних, у сотні метрів товщиною сланцевих товщ. Тобто специфіка та труднощі оцінки таких ресурсів у першу чергу визначаються особливостями їх виявлення та діагностики методами промислової геофізики.

Формулювання цілей статті. Об'єктом досліджень є геологічні структури та теригенні формації південно-східної частини ДДЗ, перспективні на виявлення нетрадиційних покладів вуглеводнів. Основною метою роботи було оцінити ефективність та особливості застосування методів промислової геофізики для виявлення та діагностики перспективних сланцевих об'єктів і газонасичених ущільнених пластів-колекторів.

Геологічні особливості об'єктів досліджень. Предметом досліджень є частина південної прибережної зони ДДЗ, яка відповідає Руденківсько-Пролетарському нафтогазоносному району. У межах району відомо 30 родовищ вуглеводнів, переважно газоконденсатних (Мачуське, Горобцівське, Руденківське, Степне, Розумівське, Новомиколаївське чи Мовчанівське, Гупалівське, Дмухалівське, Мусієнківське, Рясківське, Віноградівське, Новоселівське, Пролетарське, Перещепинське, Східно-Голубівське, Багатовське, Катеринівське, Левенцівське), нафтогазоконденсатних (Лиманське, Зачепилівське, Суходолівське, Новогригорівське, Гнатівське, Юр'ївське, Кременівське, Східно-Новоселівське, Личківське), інколи газових (Михайлівське), газонафтових (Решетниківське), нафтогазових (Голубівське).

Продуктивна частина розрізу району досліджень представлена переважно теригенними відкладами від середньодевонських до московського ярусу і навіть юри (Решетниківське газонафтове родовище). Серед піщано-алевритових порід і аргілітів зустрічаються прошарки вугілля, вапняків і доломітів. Мінеральний склад теригенних порід-колекторів різноманітний – від мономіктового кварцового до переважно полевошпатово-кварцового поліміктового. Наведені особливості інколи суттєво ускладнюють виділення пластів-колекторів, визначення їх ємнісних характеристик та ефективної товщини.

За даними лабораторних досліджень (Загнітко та Михайлов, 2014; Михайлов та Ємець, 2014; Михайлов та ін., 2014¹; Лукин, 2011 та ін.), у розрізі присутні глинисті та піщано-глинисті різновиди порід, збагачені органічною речовиною (ОР).

Більшість відкладів із підвищеним вмістом ОР формувалася в період трансресій, що супроводжувалось збільшенням частки глинистих мінералів у складі літофацій. У складі глинистих мінералів нафтогазоносних формацій переважають групи монтморилоніту та гідрослюди, силікатів, хлоритів і залізистих мінералів. Вміст деяких з них змінюється у широкому діапазоні, що пояснюється великою площею седиментаційного басейну та різноманітністю умов осадконакопичення. Співвідношення домінуючих компонентів у складі фацій, у т. ч. продуктивних, значно змінюється і тому не може бути основним критерієм їх продуктивності. У той же час ці співвідношення треба враховувати під час проектування технології видобутку вуглеводнів (Карпенко та ін., 2015).

Також, як і мінеральний склад, вміст керогену та його характеристики можуть сильно змінюватись. Петрофізичні залежності, характерні значення параметрів порід й керогену встановлюються в локально обмежених ділянках формацій з найвищими показниками продуктивності та насиченості вуглеводневими сполуками – у "солодких" ділянках. Характерною особливістю є підвищений вміст керогену, що становить не менше 2,4 % (або ТОС більше 1 %).

Резюмуючи вищесказане, слід відзначити – основне, що відрізняє продуктивні відклади, перспективні на нетрадиційні ресурси вуглеводнів, від величезних за об'ємами нафтогазоматеринських світ Північної Америки – це різноманіття та часте чергування порід різного літологічного, хімічного та фаціального складу, що суттєво ускладнює виявлення сланцевих об'єктів у розрізах свердловин за даними ГДС.

Методичні прийоми та результати досліджень. На прикладі одного з газоконденсатних родовищ Руденківсько-Пролетарського нафтогазоносного району нами було виконано спробу виявити продуктивні об'єкти на предмет наявності сланцевого газу в розрізах свердловин та оцінити їх потенційні ресурси виходячи з край обмежених даних лабораторних досліджень і досить невеликого за кількістю методів вітчизняного комплексу геофізичних досліджень свердловин.

Виділення в розрізах свердловин товщ, пов'язаних із наявністю сланцевого газу, базується на критеріях, які сформовані на основі аналізу особливостей геологічної будови та літолого-петрографічних характеристик осадків порід продуктивних частин стратиграфічних комплексів ДДЗ (Загнітко та Михайлов, 2014; Лукин, 2011; Михайлов та Ємець, 2014). Це, у першу чергу, вміст органічної рідини (ТОС більше 1 %), її термальна зрілість (коефіцієнт відбиття вітриніту R_o більше 1,2 % до 2–2,5 %), літологічний склад порід, кондиційні товщини виділених у розрізах свердловин сланцевих об'єктів (більше 20 м) та ін.

Для оцінки ресурсів сланцевого газу були використані промислово-геофізичні матеріали по низці свердловин газоконденсатного родовища. Слід зазначити, що в деяких свердловинах були відсутні дані акустичного каротажу, тому для них з метою відновлення кривих інтервального часу поздовжньої хвилі була задіяна процедура з використанням технології нейронних мереж розрахунку даних ΔT за результатами досліджень інших методів каротажу (кавернометрії, гамма-каротажу, бокового мікрокаротажу, нейтронного гамма-каротажу, 0,5 м потенціал-зонда). Зауважимо, що вибір методів засновувався на таких критеріях: мінімальний вплив характеру насичення, максимальний – літологічних особливостей, гранулометричного складу та величини пористості на покази зондів каротажу. Обов'язковою процедурою є попереднє згладжування кривих радіоактивних методів та приведення всіх кривих до "нормалізованого" стану, тобто

– нормування по значеннях, зареєстрованих напроти опорних глинистих пластів. У програмному комплексі інтерпретації даних ГДС "Геопошук" (9 версія) є можливість застосування описаної процедури відновлення кривих з використанням штучних нейронних мереж (опція "Технологія → створення синтетичної кривої").

Таким чином, при інтерпретації даних ГДС були задіяні дані нейтронних методів (НГК або ННК), а також наявних (фактичних), або створених штучно (синтетичних) кривих інтервального часу акустичного каротажу – як "методів пористості".

Методика $\Delta RLog$ для оцінки вмісту органічного вуглецю ТОС за даними парних комплексів БК – НГК (ННК), БК – АК була обрана як основна, зауважимо, що саме вона є найбільш вживаною у світі. Для контролю достовірності інтерпретації в "проблемних" та продуктивних ділянках розрізів свердловин, де є багато факторів-завад, використовувалась вітчизняна методика, яка досить добре себе зарекомендувала під час її апробації (Карпенко та ін., 2014¹). Оскільки складно віддати перевагу результатам оцінки ТОС у розрізах – або за даними БК – НГК (ННК), або БК – АК – як кінцеві значення вмісту органічного вуглецю використовувались середні арифметичні. Також додавались до розрахунків дані за нашою методикою (Карпенко та ін., 2014¹).

У результаті проведеної геологічної інтерпретації комплексу методів ГДС були визначені в поточковому режимі у межах інтервалу дослідження: коефіцієнт загальної/відкритої пористості K_p – за даними АК, НГК (ННК); коефіцієнт глинистості K_{gl} (за даними ГК); вміст органічного вуглецю ТОС – за даними БК, АК, НГК (ННК). Також за геофізичними даними було виконано попластове літологічне розчленування розрізів свердловин з виділенням основних літотипів порід.

Слід відзначити, що при розрахунках параметру ТОС за методикою $\Delta RLog$, за відсутності прямих визначень вмісту органічного матеріалу та вуглецю на керновому матеріалі з свердловин газоконденсатного родовища, не було можливості провести калібрування отриманих результатів.

Після отримання кривих наведених вище параметрів були розраховані осереднені попластові значення (приклад результату наведено на рис. 1). У розрізах свердловин на основі отриманої геологічної інформації виділені перспективні сланцевазові об'єкти за умови їх загальної товщини не менше 20 м, ТОС у прошарках виділених товщ – не менше 1 %.

З аналізу результатів інтерпретації каротажних даних (рис. 1) видно, що максимальні значення ТОС притаманні вугільним пластам або прошаркам із підвищеним вмістом вугільного матеріалу. Окрім того, розходження кривих питомого опору за БК і питомого вмісту водню ω (за НГК), як ознака суттєвого вмісту органічного вуглецю, спостерігається не лише у глинистих породах, але й напроти "чистих" пісковиків-колекторів в інтервалі 2280–2285 м (3-тя колонка справа). Це приклад хибного впливу характеру насичення (високий коефіцієнт газонасичення) пласта на оцінку вмісту ТОС за методикою $\Delta RLog$. Тут значний вплив на підвищені значення питомого електричного опору в методі БК надає високий коефіцієнт газонасичення пласта-колектора (більше за 70 %). Зрозуміло, що інтервали з наявними газонасиченими пластами-колекторами слід вилучати з розгляду при пошуках у розрізах свердловин сланцевазових покладів. При використанні іншої методики, заснованої на застосуванні лише даних неелектричних методів каротажу (Карпенко та ін., 2014¹), ця помилка була виправлена. Тобто на рис. 1 наведено результати оцінки ТОС і K_{gl} з максимальним врахуванням основних факторів, що призводять до спотворення результатів інтерпретації.

Наступним етапом було виділення в розрізах свердловин інтервалів, в яких за зазначеними вище критеріями породи можуть бути ідентифіковані як потенційні керегеномісні товщі, перспективні для видобутку сланцевого газу. У розрізі свердловини на рис. 1 можна розглянути інтервал 2309,5–2339,3 м як перспективний, де вміст ТОС вищий, або дорівнює 1 %. Наявність чотирьох вугільних прошарків не є фактором, що знижує доцільність віднесення порід (переважно глинистих) у цьому інтервалі до сланцевазових.

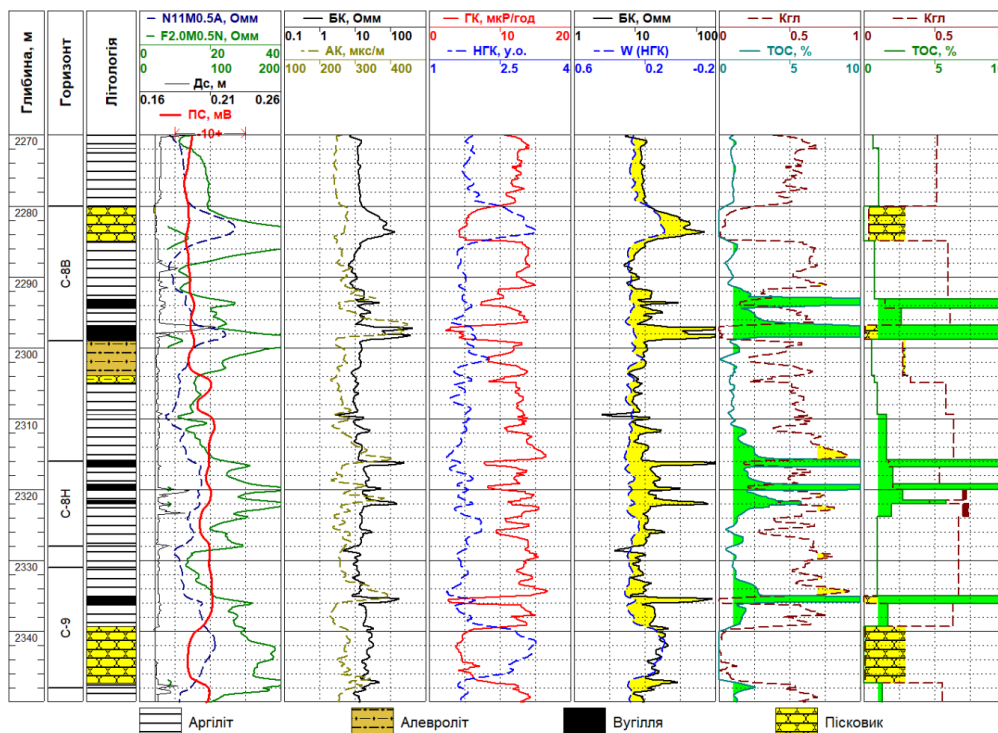


Рис. 1. Приклад оцінки вмісту органічного вуглецю (ТОС) за даними каротажу в продуктивній частині газоконденсатного родовища із значною мінливістю літологічного складу порід

Дуже важливим критерієм при діагностиці перспективних породних комплексів або поодиноких пластів (товщ) є ступінь термальної зрілості органічної речовини в них. Тут якраз є певна невизначеність: лише в розрізі одного з шести сусідніх родовищ або площ за даними лабораторних досліджень кернавого матеріалу виявлена достатня термальна зрілість аналогічних за літологією та віком порід. Коефіцієнт відбиття вітриніту R_o в аншілфах аргілітів цього родовища дорівнює 1,1 %. Там же зафіксовано "попадання" відкладів серпуховського ярусу у верхню частину температурного "вікна" із сприятливими умовами генерації сланцевого газу. Тому лише за оптимістичним сценарієм можна вважати виділені товщі з підвищеним вмістом органічної речовини перспективними на наявність промислових скопчень сланцевого газу. Причому навіть за оптимістичним прогнозом у виділених перспективних інтервалах розрізів свердловин досліджуваного газоконденсатного родовища термальна генерація вуглеводневого газу ($R_o = 1,1$ %) перебуває на початковій стадії; вміст вільного (несорбованого) газу в поровому просторі прогнозованих сланцевих товщ наближено можна оцінити як 10 % від максимального.

Наведений приклад свідчить, що лише комплексні дослідження з використанням даних лабораторних аналізів кернавого матеріалу (причому на представницьких колекціях зразків порід), результатів інтерпретації ГДС, літолого-фаціальних досліджень можуть виявити з певним ступенем ймовірності перспективні сланцеві товщі.

Відповідно до інструкції ДКЗ України (2012 р.) обрахунок загальних ресурсів газу сланцевих товщ об'ємним методом виконувався за формулою

$$Q_{гст} = S \cdot h \cdot K_n \cdot K_g \cdot f \cdot (P_n \cdot \alpha - P_k \cdot \alpha_k), \quad (1)$$

де $Q_{гст}$ – загальні ресурси газу сланцевих товщ, млн m^3 ; S – площа покладу газу в найбільш продуктивних межах сланцевої товщі, m^2 (було прийнято як площа ліцензійної ділянки); h – товщина пористої (продуктивної) частини сланцевої товщі, м; K_n – коефіцієнт відкритої пористості; K_g – коефіцієнт газонасиченості за даними геофізичних досліджень; f – поправка на температуру; P_n – середнє значення початкового пластового тиску у покладі газу сланцевих товщ, $кг/см^2$; P_k – кінцевий пластовий тиск, приймається на рівні 1 $кг/см^2$; α , α_k – стандартні поправки на відхилення вуглеводневих газів від закону Бойля–Маріотта.

За відсутності фактичних даних для оцінки ресурсів приймається умовно середній пластовий тиск у покладі газу сланцевих товщ рівний гідростатичному. Коефіцієнт газонасиченості (K_g) приймається за даними геофізичних досліджень або умовно – 0,5.

Для оцінки сорбованого та закритого у порах сланцевого газу використовувалась методика, що основана на об'ємному методі газонасиченості породи (описана в інструкції ДКЗ України від 2012 р.):

$$Q = F \cdot h \cdot \rho_n \cdot X_n, \quad (2)$$

де Q – початкові геологічні запаси газу, приведені до стандартних умов, млн m^3 ; F – площа газонасиченості, m^2 ; h – товщина перспективної товщі, м; ρ_n – густина порід, $кг/м^3$; X_n – газонасиченість порід, $m^3/кг$. Вміст сорбованого газу в гірській породі X_n ($m^3/т$) визначався на підставі графіків залежності газонасиченості від пластового тиску та вмісту органічної речовини Сорг, відомих як залежності Ленгмюра.

На основі петрофізичних даних з відомих сланцевих родовищ встановлена залежність (Карпенко та ін., 2014²):

$$Сорг = 0,03 + 2,38 \cdot ТОС. \quad (3)$$

Залежність можна використовувати для розрахунку Сорг через визначені значення ТОС за даними ГДС. Загальні ресурси сланцевого газу розраховуються як сума вільного та сорбованого газу в поровому просторі виявлених сланцевих товщ.

Разом з оцінкою ресурсів сланцевого газу в свердловинах перспективних площ виконують ще й аналіз щодо наявності рентабельних, з позиції видобутку вуглеводнів, ущільнених пластів-колекторів. Така процедура є цілком зрозумілою, особливо на родовищах, які перебувають на другій або третій (завершальній) стадії розробки газового родовища. На прикладі того ж самого родовища (див. вище) нами проведена переінтерпретація матеріалів ГДС на свердловинах з врахуванням всієї наявної петрофізичної інформації. Петрофізичні залежності та моделі вкрай важливі для попередньої оцінки колекторських властивостей ущільнених пластів, в поровому середовищі яких є достатньо вільного газу, здатного для переміщення в напрямку видобувної свердловини. Такі пласти за своїми петрофізичними характеристиками знаходяться за межами граничних значень фільтраційно-ємнісних властивостей. За результатами аналізу літературних джерел, щодо досвіду видобутку вуглеводневого газу з ущільнених колекторів, коефіцієнт газонасичення K_g останніх лежить у межах від 0,35 до 0,6 і вище (маловодні колектори). Нами обрана величина $K_g = 0,4$, яка відповідає середньому значенню газонасичення порід у діапазоні зміни пористості від 6,5 до 10,5 % (аналіз залежності "коефіцієнт залишкового водонасичення $K_{зв}$ – коефіцієнт пористості K_p " для порід серпуховського ярусу). Вище 10,5 % – область існування порід-колекторів з підтвердженими промисловими припливами вуглеводнів. Тут згідно із залежністю (4) коефіцієнт газонасичення більший 52 %:

$$K_{зв} = 0,176 \cdot K_p^2 - 8,407 \cdot K_p + 121,14, \quad R^2 = 0,8. \quad (4)$$

При інтерпретації даних ГДС слід орієнтуватись у першу чергу на інтервали розрізів свердловин, що лежать у межах доведеної області можливого існування газонасичених порід (якщо встановлені вертикальні та горизонтальні границі для газових покладів). Слід зазначити, що при зменшенні коефіцієнта газонасичення порід менше 0,5–0,4 точність оцінки останнього за даними методів опору суттєво знижується (особливості інтерпретаційних моделей електропористості). Тому тут краще використовувати сталу величину K_g . У даному випадку нами для коефіцієнта газонасичення ущільнених колекторів рекомендоване значення 0,4.

Інтерпретація даних ГДС була виконана за класичною схемою: для оцінки пористості порід у поточковому режимі використовувались дані акустичного, нейтронного (або НГК) і гамма-каротажів. З урахуванням літологічних ознак, величини глинистості й пористості були виділені окремі пласти, які відповідали газонасиченим ущільненим пластам вище нижньої межі пористості 6,5 %. Результати проведеної кількісної інтерпретації, як приклад, наведено на планшетах геофізичних діаграм на рис. 2.

На планшетах виведені вихідні дані у вигляді каротажних діаграм, результати кількісної інтерпретації – $K_{гп}$, K_p , K_g у поточковому та поплатовому вигляді. Наводяться газонасичені пласти-колектори, які були виділені та оцінені при попередній інтерпретації. Також на планшетах відображаються ущільнені газонасичені та водонасичені пласти.

На рис. 2 у правій колонці з результатами поплатової оцінки пористості та коефіцієнта газонасичення пластів наочно видно, що до попередньо виділених пластів-колекторів із кондиційними значеннями ємнісних характеристик прилягають ущільнені пласти. Ущільнені пласти пісковиків характеризуються значеннями пористості у межах 7–8 %. Таким чином, результати повторної інтерпретації даних ГДС дозволили уточнити межі та інтервали поширення газонасичених пластів-колекторів та їх ущільнених різновидів, наростити ресурсну базу вуглеводнів на родовищі.

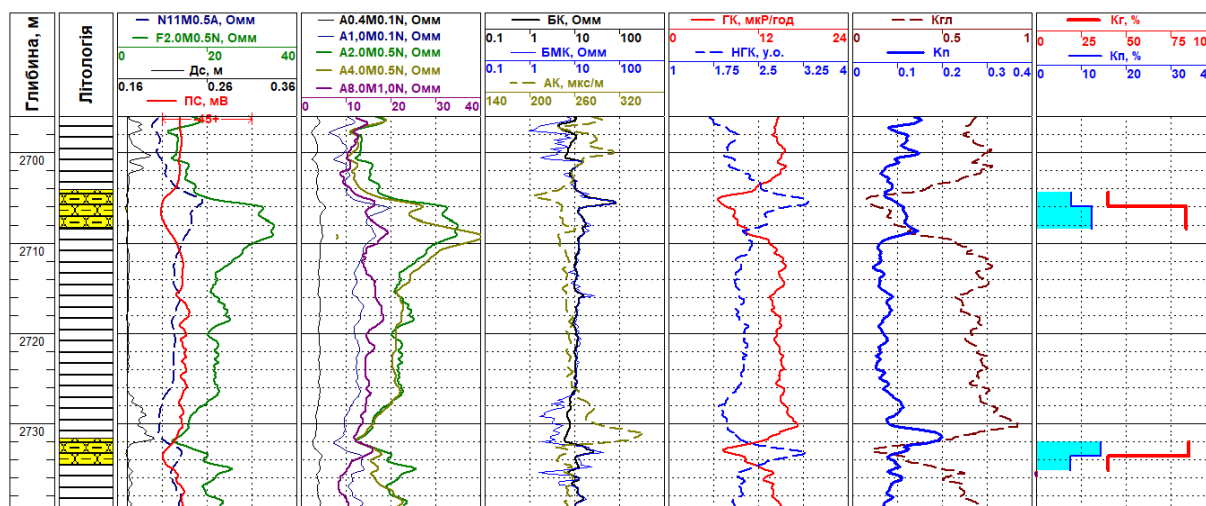


Рис. 2. Приклад виділення ущільнених газонасичених пластів-колекторів за даними ГДС у продуктивній частині газоконденсатного родовища

Висновки. Результати виконаної повторної інтерпретації даних ГДС на родовищі вуглеводнів за спеціальними методиками з урахуванням літолого-петрофізичних особливостей порід продуктивної частини розрізу дозволяють суттєво уточнити ресурсну базу газу нетрадиційних колекторів. Щодо оцінки ресурсів сланцевого газу, то поряд з отриманими даними вмісту органічного вуглецю, пористості й глинистості (за даними ГДС) слід враховувати результати лабораторних аналізів на предмет термальної зрілості керогену відкладів, що вивчаються, та кондиційні товщини виділених перспективних об'єктів. Рекомендовані найбільш імовірні значення ємнісних характеристик порід із кондиційними значеннями ТОС для розрахунку об'ємів адсорбованого газу.

Численні публікації та виконані науково-дослідні роботи свідчать про можливу наявність значного вуглеводневого потенціалу сланцевих товщ у межах Дніпровсько-Донецької западини (Vyzva and Mikhailov, 2013). Для підвищення достовірності таких прогнозів слід суттєво збільшити об'єми спеціальних лабораторних досліджень керна з підвищеним вмістом органічної речовини, здійснювати переінтерпретацію даних ГДС на перспективних ділянках.

При оцінці наявності ущільнених колекторів та розрахунках ресурсів газу об'ємним методом слід виконувати переінтерпретацію даних ГДС у межах встановлених інтервалів газонасиченості порід. Коефіцієнт газонасиченості таких порід слід приймати на рівні 0,4; коефіцієнт пористості – за результатами інтерпретації даних ГДС за стандартними методиками. Результати виділення ущільнених газонасичених пластів слід використовувати при створенні або уточненні гідродинамічних моделей покладів вуглеводнів, проектуванні додаткових заходів підвищення продуктивності видобувних свердловин.

Список використаних джерел

- Вакарчук С.Г., Довжок Т.С., Філюшкін К.К. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. VI. Перспективи освоєння ресурсів газу щільних порід в Східному нафтогазоносному регіоні. К.: ТОВ "ВТС ПРИНТ".
- Вакарчук С.Г., Зейкан О.Ю., Довжок Т.С., Михайлов В.А. та ін. (2013). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. V. Перспективи освоєння ресурсів сланцевого газу та сланцевої нафти в Східному нафтогазоносному регіоні. К.: ТОВ "ВТС ПРИНТ".
- Загнітко В.М., Михайлов В.А. (2014). Геохімічні особливості газової складової газонасичених сланцевих товщ України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1 (64), 11–17.
- Зеленко Ю.М., Карпенко О.М., Дзюба О.В. (2017). Оцінка перспективності кам'яновугільних товщ південно-східної частини Дніпровсько-Донецької западини на поклади газу нетрадиційного типу. *Науковий вісник НГУ*, 1(157), 20–26.
- Карпенко І.О. (2017). Нафтогазова система південної прибортованої зони Дніпровсько-Донецької западини. *Дис. ... канд. геол. наук*. Київ.

Карпенко І.О. (2018). Нафтогазова система Дніпровсько-Донецької западини. Кн. 1. Південна прибортова зона. Saarbrücken.

Карпенко І.О., Карпенко О.М., Башкіров Г.Л. (2014²). Петрофізичні передумови оцінки вмісту керогену в гірських породах за даними промислової геофізики. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 4(67), 44–48.

Карпенко О., Михайлов В., Карпенко І. (2015). До прогнозу освоєння вуглеводневих ресурсів східної частини ДДЗ. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(68), 49–54.

Карпенко О.М., Башкіров Г.Л., Карпенко І.О. (2014¹). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 3(66), 71–76.

Лукин А.Е. (2011). Перспективи сланцевої газонасиченості Дніпровсько-Донецького авлакогена. *Геологічний журнал*, 1, 21–41.

Михайлов В., Курило М., Андреева О. (2014²). Принципи геолого-економічної оцінки нетрадиційних ресурсів вуглеводнів. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 2 (65), 40–44.

Михайлов В.А., Вихва С.А., Загнітко В.М. та ін. (2014¹). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. IV. Східний нафтогазоносний регіон: аналітичні дослідження. К: ВПЦ "Київський університет".

Михайлов В.А., Ємець О.В. (2014). Рівень дозрілості органічної речовини Дніпровсько-Донецької западини у зв'язку з перспективою відкриття родовищ нетрадиційного газу. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1 (64), 48–53.

Михайлов В.А., Огар В.В., Зейкан О.Ю. та ін. (2011). Перспективи газонасиченості сланцевих відкладів Дніпровсько-Донецької западини. *Геолог України*, 2, 51–58.

Поліщев А. В., Рибак Л. А., Кондратьєва Н. А., Філатова Т.І., Сахарук С.П., Рябуха В.В. (2008). Проблеми та результати створення петрофізичних моделей нетрадиційних колекторів родовищ ДДЗ. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 5, 49–59.

Рибалка С., Карпенко О. (2016). Колекторські властивості теригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 1(72), 56–59.

Carpenter, B. Alain-Yves, Y. Method for estimating the organic matter content of sedimentary rocks from data recorded in wells by well-logging probes. *USA Patent* 5,126,939. Int. Cl. G01V 1/00. G06F 15/48. 30.06.1992.

Fertl, H.W., Chillingar, V. (1988). Total organic carbon content determined from wireline well logs. SPE Formation Evaluation. SPE-15612-PA. Отримано з URL <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-15612-PA>.

Passey, Q., Creaney, S., Kulla, J., Moretti, F. and Stroud, J. (1990). A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74(17), 1777–1794.

Passey, Q.R., Dahlberg, K.E., Sullivan, K., Yin H., Brackett R., Xiao, Y., Guzman-Garcia A.G. (2006). Petrophysical Evaluation of Hydrocarbon Porosity in Thinly Bedded Clastic Reservoirs. *AAPG Archie Series*, 1.

Vyzva, S.A., Mikhailov, V.A. (2013). Implications for unconventional hydrocarbons exploration and production in Ukraine. 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers, 4927–4931.

References

- Carpenter, B. Alain-Yves, Y. Method for estimating the organic matter content of sedimentary rocks from data recorded in wells by well-logging probes. *USA Patent* 5,126,939. Int. Cl. G01V 1/00. G06F 15/48. 30.06.1992.
- Fertl, H.W., Chillingar, V. (1988). Total organic carbon content determined from wireline well logs. SPE Formation Evaluation. SPE-15612-PA. Отримано з URL <https://www.onepetro.org/journal-paper/SPE-15612-PA>.
- Карпенко І.О. (2017). Oil and gas system of the southern dasboard zone of the Dnieper-Donetsk basin. *Dis. ... Cand. Geol. Sciences*. Kiev

Karpenko, I.O. (2018). Oil and gas system of the Dnieper-Donetsk basin. Book 1. Southern dash area. Saarbrücken, 1-148.

Karpenko, I.O., Karpenko, O.M., Bashkurov, G.L. (2014²). Petrophysical prerequisites for estimation of kerogen content in rocks by the well-logging. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (67), 44-48.

Karpenko, O., Mykhailov, V., Karpenko, I. (2015). To the forecast of development of hydrocarbon resources of the eastern part of the DDB. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (68), 49-54.

Karpenko, O.M., Bashkurov, G.L., Karpenko, I.O. (2014¹). Determination of organic matter content in rocks by well-logging data. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (66), 71-76.

Lukin, A.E. (2011). Prospects for shale gas-bearing of the Dnieper-Donetsk avlucogene. *Geological Journal*, 1, 21-41.

Mykhailov, V., Kurilo, M., Andreeva, O. (2014²). Principles of geological and economic evaluation of unconventional hydrocarbon resources. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2 (65), 40-44.

Mykhailov, V.A., Ogar, V.V., Zeikan, O.Y. et al. (2011). Prospects for gas content of shale deposits of the Dnieper-Donetsk basin. *Geologist of Ukraine*, 2, 51-58.

Mykhailov, V.A., Vyzhva, S.A., Zagnitko, V.M. et al. (2014¹). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book. IV. Eastern oil and gas region: analytical research. K: Kyiv University.

Mykhailov, V.A., Yemets, O.V. (2014). The level of maturity of organic matter of the Dnieper-Donetsk region due to the prospect of unconventional gas deposits opening. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (64), 48-53.

Passey, Q., Creaney, S., Kulla, J., Moretti, F. and Stroud, J. (1990). A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74(17), 1777- 1794.

Passey, Q.R., Dahlberg, K.E., Sullivan, K., Yin H., Brackett R., Xiao, Y., Guzman-Garcia A.G. (2006). Petrophysical Evaluation of Hydrocarbon Pore-thickness in Thinly Bedded Clastic Reservoirs. *AAPG Archie Series*, 1.

Polivtsev, A.V., Rybak, L.A., Kondratieva, N.A., Filatova, T.I., Sakharuk, S.P., Ryabukha, V.V. (2008). Problems and results of petrophysical models creation of unconventional DDB reservoirs. *Theoretical and Applied Aspects of Geoinformatics*, 5, 49-59.

Rybalka, S., Karpenko, O. (2016). Reservoir properties of terrigenous rocks at great depths of the central part of the Dnieper-Donetsk depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (72), 56-59.

Vakarchuk, S.G., Dovzhok, T.E., Filyushkin, K.K. etc. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book. VI. Prospects for development of tight gas resources in the Eastern Oil and Gas Region. K.: VTS PRINT LLC.

Vakarchuk, S.G., Zeykan, A.Y., Dovzhok, T.E., Mykhailov, V.A. et al. (2013). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book. V. Prospects for exploration of shale gas and shale oil resources in the Eastern oil and gas region. K.: VTS PRINT LLC.

Vyzva, S.A., Mikhailov, V.A. (2013). Implications for unconventional hydrocarbons exploration and production in Ukraine. 75th European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition 2013 Incorporating SPE EUROPEC 2013: Changing Frontiers, 4927-4931.

Zagnitko, V.M., Mykhailov, V.A. (2014). Geochemical features of gas component of gas-bearing shale deposits of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (64), 11-17.

Zelenko, Y.M., Karpenko, O.M., Dziuba, O.V. (2017). Estimation of the t coal depositsprospec of the southeastern part of the Dnieper-Donetsk basin for unconventional gas deposits. *NMU Scientific Bulletin*, 1 (157), 20-26.

Надійшла до редколегії 20.08.19

O. Karpenko¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.

E-mail: karpenko.geol@gmail.com;

V. Mikhailov¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.

E-mail: vladvam@gmail.com;

I. Karpenko², PhD (Geol.)

E-mail: sharanskiy@gmail.com;

¹Taras Shevchenko National University of Kyiv,

Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;

²Naftogaz of Ukraine Joint Stock Company

RESOURCE ASSESSMENT FEATURES OF NON-TRADITIONAL RESERVOIRS BY THE WELL-LOGGING DATA

Possibilities of estimation of shale gas resource and gas of tight reservoirs with the use of the well-logging data on the example of typical gas-condensate field in the southern side of the Dnieper-Donetsk Depression are considered. The peculiarity of such works at this stage of studying the prospects of unconventional hydrocarbon resources in Ukraine is the shortage of factual material regarding special geochemical analysis of the core from perspective intervals of well sections. Emphasis is placed on the application of data from the standard set of well-logging methods. Using the method of Q. Passy, the content of organic carbon (TOC) in the rocks within the intervals of drilled wells was estimated. The characteristics of the lithological composition of rocks and the gas saturation of the traditional type of reservoirs were taken into account in the well-logging data. In the absence of available core data on thermal maturity of the rocks within the identified promising thicknesses, gas resources were estimated in several scenarios. The peculiarities of the well-logging data interpretation in the case of cross sections of wells of gas-saturated rocks with capacitance characteristics below the limit are given. Dependencies of the type "porosity - permeability", "porosity - residual water saturation" should be used to establish a lower porosity and gas saturation limit for tight reservoirs. At the end of the article, recommendations for calculating of gas resources in non-conventional reservoirs are provided.

Keywords: gas resources, unconventional reservoir; gas condensate field; shale gas, tight gas, well-logging.

A. Карпенко¹, д-р геол. наук, проф.

E-mail: karpenko.geol@gmail.com;

B. Михайлов¹, д-р геол. наук, проф.

E-mail: vladvam@gmail.com;

I. Карпенко², канд. геол. наук,

E-mail: sharanskiy@gmail.com;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна;

²Національна акціонерна Компанія "Нафтогаз України"

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ГАЗА НЕТРАДИЦИОННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН

Рассмотрены возможности оценки ресурсной базы сланцевого газа и газа уплотненных коллекторов с использованием данных геофизических исследований скважин на примере типичного газоконденсатного месторождения южной прибортовой части Днепровско-Донецкой впадины. Особенностью подобных работ на данном этапе изучения перспектив нетрадиционных ресурсов углеводородов в Украине является дефицит фактического материала специальных геохимических исследований керна из перспективных участков разрезе скважин. Основной упор сделан на применение данных стандартного комплекса методов промысловой геофизики. С использованием методики К. Пасси оценено содержание органического углерода в породах в пределах перспективных интервалов пробуренных скважин. При интерпретации данных геофизических исследований скважин (ГИС) были учтены особенности литологического состава горных пород, газонасыщенность пластов-коллекторов традиционного типа. В условиях отсутствия керновых данных по определению термальной зрелости пород в пределах выявленных перспективных толщ выполнена оценка ресурсов газа по нескольким сценариям. Приведены особенности интерпретации данных ГИС при поисках в разрезах скважин газонасыщенных пород с емкостными характеристиками ниже граничных (кондиционных). Следует использовать зависимости типа: коэффициент пористости – коэффициент проницаемости, коэффициент пористости – коэффициент остаточной водонасыщенности для установления нижней границы пористости и газонасыщенности для уплотненных коллекторов. В статье приведены рекомендации по расчетам ресурсов газа, содержащегося в коллекторах нетрадиционного типа.

Ключевые слова: ресурсы газа, нетрадиционный коллектор, газоконденсатное месторождение, сланцевый газ, уплотненный коллектор, геофизические исследования скважин.

УДК 550.382.3+631.4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.09>О. Круглов¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: alex_kruglov@ukr.net;

О. Меньшов², д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: menshov.o@ukr.net;

В. Соловей¹, канд. с.-г. наук;В. Лебедь¹, наук. співроб.;О. Андрєєва², канд. геол. наук, наук. співроб.;¹ ННЦ "Інститут ґрунтознавства та агрохімії імені О.Н. Соколовського",

вул. Чайковська, 4, м. Харків, 61024, Україна;

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ДІАГНОСТУВАННЯ ГЕНЕТИЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЧОРНОЗЕМНИХ ҐРУНТІВ МЕТОДАМИ МАГНІТОМЕТРІЇ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. П.О. Міненком)

Еколого-генетичний статус ґрунтів, що визначається ходом процесу ґрунтоутворення, є вирішальним фактором при оптимізації його сільськогосподарського використання для досягнення сталого стану. Визначення розробленого в Україні якісного показника такого статусу (КВАГ) характеризується високими витратами ресурсів та праці. Для вирішення проблеми пропонується заміна агрохімічних методів досліджень на менш вартісні магнітні. Мета дослідження – показати інформативність геофізичних методів для індикації процесу педогенезу на прикладі чорноземів опідзолених Харківської області. Використано стандартизовані дослідження визначення вмісту органічного вуглецю, гранулометричного складу, рН. Характеристику місця відбору проб на схилі проводили за допомогою визначення індексу ерозійної небезпеки. Було проведено відбір зразків та вимірювання у лабораторних умовах питомої магнітної сприйнятливості ґрунту (МС). Дослідні ділянки були розташовані в ареалі поширення чорноземів опідзолених, у північній частині Харківського району та центральній частині Печенізького району Харківської області. Генетична належність ґрунту була попередньо визначена за картами великомасштабного обстеження та уточнена польовими дослідженнями. Для ґрунтів схилу, що ускладнений ерозійними процесами, спостерігається залежність МС від генетичного статусу. Це дає змогу використання МС не лише у межах єдиного агроценозу, а й у суміжних агроландшафтах для ґрунтів, розвиток яких ускладнений гідроморфізмом. Дослід було проведено на одноступінній терасі р. Сіверський Донець, де розвинуті ґрунти різного ступеня гідроморфізму. На прикладі опідзолених ґрунтів Харківщини показано можливість індикації прояву гідроморфних процесів у нижній частині ґрунтового профілю. Зафіксовано зниження значень МС порівняно з фоновими. На прикладі ріллі показано можливість заміни вартісного визначення вмісту гумусу на більш дешеве вимірювання МС при визначенні показників еколого-генетичного статусу ґрунту. Коефіцієнт кореляції між показниками КВАГ та КВАМС (заміна визначення гумусу на МС) склав $\rho=0,901$.

Ключові слова: ґрунти, магнітна сприйнятливість, схил, гумус, гідроморфізм.

Вступ. Питання збереження родючості ґрунтового покриву стоїть не лише перед землекористувачами та аграрною наукою, а й перед державою в цілому. Це можливо лише за умови поєднання зусиль усієї наукової спільноти для розробки нових методів та методик дослідження властивостей ґрунту, що дозволить робити більш точні, оптимальні та виважені рекомендації з їх моніторингу, охорони та використання. Значні обсяги ґрунтів у активному обробітку (площа ріллі понад 32 млн га) та велика кількість формальних землеволодінь (близько 7 млн га) вимагають росту продуктивності ґрунтових обстежень, причому з початком функціонування ринку земель сільськогосподарського призначення актуальність таких досліджень буде тільки зростати (Соловей, 2016).

Стан проблеми. Напрямок, у якому відбувається процес ґрунтоутворення, – найважливіший параметр характеристики ґрунтового покриву, що визначає його еколого-генетичний статус. Саме він є вирішальним фактором при оптимізації його сільськогосподарського використання для досягнення сталого стану.

Для визначення ходу ґрунтоутворення досліджується профіль ґрунту, саме від особливостей поєднання його горизонтів і залежить генетичний статус. Для зменшення впливу суб'єктивного чинника у світі розвиваються методи діагностування за якісними ознаками. В Україні свого часу було запропоновано методи, що ґрунтуються на особливостях профільного розподілу гумусу (КПНГ) та співвідношеннях між вмістом гумусу та фізичної глини (КВАГ) (Полупан та ін., 2005¹). Застосування цих методів частково обмежується високою працездатністю та ресурсоемістю визначень та відбору проб.

Відомі спроби заміни агрофізичних та агрохімічних методів дослідження геофізичними, насамперед магнітометричними та електрометричними. Цей напрямок в

Україні розвивається під назвою "агрогеофізика" (Сухограда, 2001). Найбільшого поширення набули саме магнітні (педомагнітні) методи з використанням різних видів магнітної сприйнятливості (МС) (Шепель та ін., 2001). Її визначення характеризуються на порядок нижчими витратами ресурсів порівняно з класичними ґрунтознавчими технологіями. Основою їх застосування став тісний зв'язок між вмістом органічного вуглецю (C_{org}) та МС (Menshov et al., 2018). Такий зв'язок доведено для більшості автоморфних ґрунтів у різних природно-кліматичних зонах. Найбільш докладно вивчений зв'язок між вмістом гумусу та МС на прикладі Чехії (коефіцієнт кореляції досягає: $R^2=0,97$) (Jakšik et al., 2016), Китаю (Wang et al., 2008), Бразилії ($R^2=0,85$) (Peluco et al., 2013). В Україні також було показано високий ступінь зв'язку між вмістом гумусу та МС: $R^2=0,76$ для чорнозему типового (Назарок та ін., 2015). Свого часу нами було проведено дослідження статистичних характеристик паралельного застосування для визначення еродованості ґрунтів даних про МС, вміст гумусу та результатів математичного моделювання ерозії (індекс ерозійної небезпеки за Куценком (Куценко та Тімченко, 2016)). Результати показали практичну ідентичність використання як даних про вміст гумусу, так і даних про МС ґрунту при оцінюванні його еродованості (Круглов та ін., 2018).

Високий ступінь зв'язку МС та вмісту гумусу було показано і на прикладі схилових чорноземних ґрунтів південної частини Харківської області. У цьому дослідженні коефіцієнт кореляції Спірмена у парі – вміст гумусу – МС лежить у межах 0,75–0,81 та залежить від частоти визначення (Круглов та ін., 2019).

Концентрація сильномагнітних сполук заліза у глинистій фракції (ФГ) зумовлює і зв'язок між вмістом фізичної глини та МС. Так високий ступінь зв'язку МС та вмісту ФГ

схилових ґрунтів півдня Бразилії був показаний бразильськими дослідниками (Santos *et al.*, 2013). Нами було виявлено значення цього показника $R^2=0,83$ для чорноземів півночі Харківщини (Круглов, 2012). Тому перспективним видається наукове дослідження, що розгляне варіанти заміни найбільш ресурсоємних методів агрофізики та агрохімії магнітними методами.

При дослідженні явищ ерозії та деградації ґрунтового покриву необхідно враховувати антропогенний вплив на довкілля (Falshtynskyi *et al.*, 2018; Petlovanyi *et al.*, 2019), що може вносити суттєві зміни у магнітні властивості ґрунтів. Крім того, важливими є сучасні неотектонічні рухи (Ivanik *et al.*, 2019). Загальна теорія та методологія застосування інноваційних магнітних методів, а також деякі практичні результати робіт наведені у (Меньшов та Сухорада, 2017; Gadirov *et al.*, 2018; Меньшов, 2016, 2018; Menshov *et al.*, 2020). Теоретичні основи моделювання геофізичних параметрів наводяться у (Вижва та ін., 2017; Продайвода та ін., 2000).

Мета дослідження – показати інформативність геофізичних методів для індикації процесу педогенезу на прикладі чорноземів опідзолених Харківської області.

Методи та об'єкти. При виконанні дослідження використано стандартизовані дослідження визначення вмісту органічного вуглецю (з подальшим перерахунком у гумус) за ДСТУ ISO 14235:2005 та визначення гранулометричного складу ґрунту методом піпетки у модифікації Н.А. Качинського (ДСТУ-4730:2007), визначення pH (ISO 10390:2005, IDT): ДСТУ ISO 10390:2007). Характеристику місця відбору проб на схилі проводили за допомогою визначення індексу ерозійної небезпеки (Куценко та Тімченко, 2016). Питому магнітну сприйнятливість ґрунту (МС) визначали за допомогою лабораторного капамістка KLY-2 (Agico) та двочастотного капаметра MS2 (Bartington) за методикою, що наведена у (Evans and Heller, 2003). Маса зразка ґрунту визначалася за допомогою електронних ваг Ohaus 402.

Дослідні ділянки були розташовані в ареалі поширення чорноземів опідзолених – північна частина Харківського району та центральній частині Печенізького району Харківської області (рис. 1), оглядову карту наведено на рис. 1.б. Генетична належність ґрунту була попередньо визначена за картами великомасштабного обстеження та уточнена польовими дослідженнями.

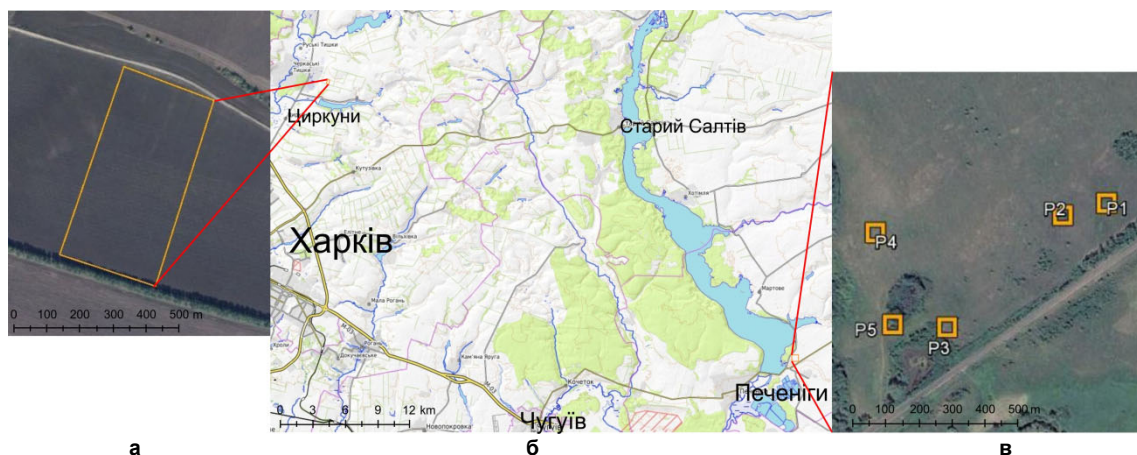


Рис. 1. Схема розміщення дослідних ділянок:

а – ділянка 1, територія відбору проб верхнього горизонту ґрунту, б – оглядова карта місцевості, в – ділянка 2, місця закладки ґрунтових розрізів

Дослідна ділянка 1 використовується як рілля місцевим сільськогосподарським підприємством та розташована на схилі крутизною 4–5°. Всього було відібрано на різних елементах схилу 23 проби ґрунту. З південної сторони ділянка обмежується лісосмугою, а з північної – автодорогою місцевого значення. Основне завдання досліджень – показати результати заміни агрофізичних показників та встановити їх зв'язок із геофізичними параметрами.

Дослідна ділянка 2 використовується як пасовище. Вона розташована в межах річкової долини Сіверського Донця. Було досліджено 5 ґрунтових розрізів з відбором проб ґрунту з генетичних горизонтів. Акцент було зроблено на ілюстрацію змін якісних показників еколого-генетичного статусу ґрунтів залежно від ступеня їх гідроморфності.

Результати та їх обговорення. Традиційно для загальної характеристики господарських властивостей ґрунтового покриву використовують обмежений набір параметрів: вміст S_{org} (гумусу), вміст фізичної глини (фракція дрібніше 0,01 мм), pH, вміст обмінних фосфору та калію. Звичайно вони залежать від особливостей використання території (система землеробства, удобрення, протиерозійний захист, меліорації).

На території дослідної ділянки 1 було відібрано 23 проби ґрунту з шару 0–30 см, у яких було визначено вміст гумусу та фізичної глини. Третім визначеним параметром ґрунтів стала питома магнітна сприйнятливість. Результати подано в табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення деяких характеристик ґрунту ділянки 1

Показник	N	Середнє арифм.	Медіана	Мінімум	Максимум	Станд. відхилення	Коеф. варіації, %
Уміст гумусу, %	23	3,52	3,38	2,70	4,37	0,52	14,85
Уміст фіз. глини, %	23	53,60	53,95	43,66	60,15	4,20	7,83
МС, 10^{-9} м ³ /кг	23	644,44	588,96	509,34	810,78	102,82	15,95

Як бачимо, варіативність показників МС та вмісту гумусу є практично ідентичними, особливо з огляду на вищу відносну похибку при визначенні за ДСТУ ISO 14235 порівняно з визначенням МС. Значення середнього

арифметичного всіх трьох характеристик відрізняються від значень медіани, що пояснюється нееквівалентною кількістю відібраних проб на кожному з елементів схилу – у верхній, середній та нижній частинах. Враховуючи

розвиток ерозійних процесів варіативність вмісту гумусу та МС є досить помірною, а вміст фізичної глини у цьому аспекті є найбільш консервативним. Падіння вмісту гумусу по профілю становить 38 %, а фізичної глини – 27,2 %.

Поряд з вказаними показниками предметом вивчення ґрунтознавців у останні роки стають їх похідні, що, на думку авторів, найкраще відображають еколого-генетичний статус ґрунту (Полупан та ін., 2005²). До таких передусім відносять КВАГ (у межах типу) – відношення вмісту гумусу до вмісту фізичної глини у шарі 0–30 см. У табл. 2 подано результати такого перерахунку (помножене на 10). У межах даного дослідження запропоновано заміну вмісту гумусу в подібних формулах на МС (КВАМС). На території дослідної ділянки розвинуті ерозійні процеси, тому важливою характеристикою місця відбору проби є результат моделювання інтенсивності ерозійних процесів. Нами було прийнято коефіцієнт ерозійної небезпеки за М. Куценком (ЕІ), що враховує основні параметри: довжину та крутизну схилу, шорсткість поверхні та максимальну нерозмивну швидкість водного потоку. Крутизна поверхні та довжина схилу визначалась за допомогою QGIS, де аналізувались дані, отримані за допомогою оцифрованої топокарти 1 : 10 000. Результати розрахунків представлено в табл. 2.

Дані табл. 2 свідчать про однакові показники варіативності КВАГ та КВАМС, що характеризуються як незначні (Лакин, 1985). Коефіцієнту ерозійної небезпеки ІЕ, навпаки, притаманна висока варіативність. Відмінності середніх значень від медіани значно нижчі за аналогічну характеристику даних табл. 1. Значення КВАГ (0,51–0,78) характерні для чорноземів опідзолених на схилах (Полупан та ін., 2005¹). Висновок про коректність заміни вмісту гумусу на МС при визначенні еколого-генетичного статусу ґрунтів можна зробити на основі кореляції основних їх показників (табл. 3). Враховуючи невелику кількість точок опробувань (n=23) та високу різницю між середнім арифметичним та медіаною у виборках, для дослідження зв'язку використовувався коефіцієнт кореляції Спірмена ρ .

Як бачимо, між КВАГ та КВАМС зафіксовано тісний зв'язок ($\rho=0,90$). При цьому КВАМС має дещо вищий ступінь зв'язку з усіма іншими досліджуваними показниками, а у випадку з ІЕ – суттєво вищий. Отже, КВАГ є показником більш стійким до дії ерозійних процесів порівняно з КВАМС, МС та, особливо, вмістом гумусу. Особливості розсіювання КВАГ та КВАМС зображено на рис. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків деяких характеристик ґрунту ділянки 1

Показник	N	Середнє арифм.	Медіана	Мінімум	Максимум	Станд. відхилення	Коеф. варіації, %
КВАГ	23	0,6571	0,6701	0,5108	0,7827	0,0770	11,84
КВАМС	23	11,9941	11,8345	9,8480	14,2343	1,3816	11,51
ІЕ	23	1,3516	1,3951	0,4662	1,8187	0,4558	33,33

Таблиця 3

Значення кореляції Спірмена між досліджуваними показниками, (n=23, $\rho<0,05$)

Показник	ІЕ	КВАГ	КВАМС	МС	Уміст гумусу
ІЕ	-	-0,5345	-0,6778	-0,8181	-0,8250
КВАГ	-0,5345	-	0,9012	0,7628	0,8151
КВАМС	-0,6778	0,9012	-	0,9002	0,8527
МС	-0,8181	0,7628	0,9002	-	0,9463
Уміст гумусу	-0,8250	0,8151	0,8527	0,9463	-

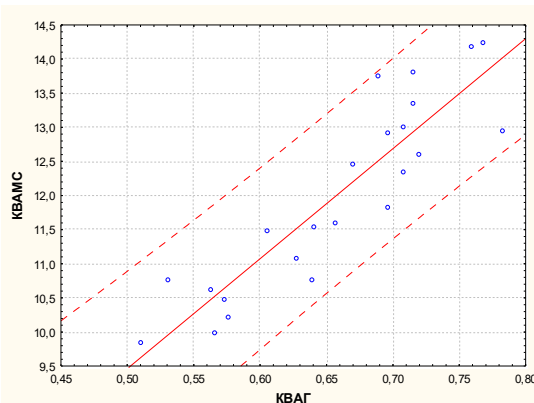


Рис. 2. Діаграма розсіювання КВАГ та КВАМС ґрунтів дослідної ділянки 1

Як показано на рис. 2 зв'язок між двома досліджуваними параметрами є досить тісним, найбільший ступінь відхилення від лінії тренду характерний для верхнього квартилю значень вибірок. Ці точки відбору у природі відповідають верхній частині схилу.

Якщо на ґрунтах схилу, навіть ускладненому ерозійними процесами, спостерігається досить виражена інформативність МС для індикації генетичного статусу, то виникає питання використання її не лише в межах єдиного агроценозу, а й у суміжних агроландшафтах для ґрунтів, педогенез яких ускладнений гідроморфізмом. Такий дослід було поставлено на однолесовій терасі

р. Сіверський Донець, де розвинуті ґрунти різного ступеня гідроморфізму (Лебедь та Соловей, 2019). Було закладено 5 розрізів, що представлені як автоморфними ґрунтами, так і з різним ступенем гідроморфізму.

МС ґрунтів заплав Лісостепової зони України залежить від їх ландшафтного положення, її значення зростає у ряду субаквальні – супераквальні – елювіальні елементарні геохімічні ландшафти (Сухорада та ін., 2005). Гідроморфний процес сприяє утворенню закисних форм заліза у ґрунтах, тобто їх МС має низькі та помірні значення (Водяницький, 1989).

У рамках виконання даного дослідження для відібраних проб ділянки 2 було визначено, аналогічно до ділянки 1:

МС, уміст гумусу та фізичної глини. Для додаткового діагностування гігморфних процесів визначалась рН генетичних горизонтів ґрунтового профілю. Результати вимірювання та короткий опис будови профілів подано на рис. 3. Загальною рисою розрізів є їх невелика потужність – горизонт Р починається з рівня 100–120 см.

МС ґрунотворної породи досліджених ґрунтів лежить у межах $50\cdot 10^{-9}$ м³/кг за винятком оглеєного ґрунту розрізу 3, що знижується до $10\cdot 10^{-9}$ м³/кг. Фонові значення для лесів Харківської області дещо вищі: $130\text{--}210\cdot 10^{-9}$ м³/кг (Круглов та ін., 2019). На прояви гігморфізму та сольових процесів вказує поступове підвищення рН з глибиною у всіх випадках.

Аналогічно до досліджень з пробами ділянки 1 було проведено визначення КВАГ та КВАМС. Результати представлено в табл. 4.

Результати КВАГ дещо вищі, ніж у ґрунтів ділянки 1, що пояснюється режимом використання ділянки (переліг). Значення КВАМС лежить у межах діапазону, притаманного ґрунтам ділянки 1, за винятком розрізу Р4П, який характеризується також підвищеним значенням КВАГ. Зв'язку між КВАГ та КВАМС не виявлено.

Загальний обсяг вибірки проб ґрунтів з різних генетичних горизонтів становить 27 зразків. Було досліджено можливий зв'язок між основними показниками. Результати наведено в табл. 5.

Таблиця 4

Результати визначень КВАГ та КВАМС у ґрунтах дослідної ділянки 2

№ розрізу	Назва ґрунту	КВАГ	КВАМС
Р1П	Лучно-чорноземний (опідзолений) глибоко-слабоосолоділий важкосуглинковий	1,1	8,13
Р2П	Чорнозем опідзолений важкосуглинковий на лесі	1,0	13,2
Р3П	Дерновий опідзолений глеюватий легкосуглинковий	1,0	12,6
Р4П	Чорноземно-лучний слабосолонцюватий легкосуглинковий	1,5	24
Р5П	Лучно-чорноземний слабосолонцюватий легкосуглинковий на лесі	1,4	11,3

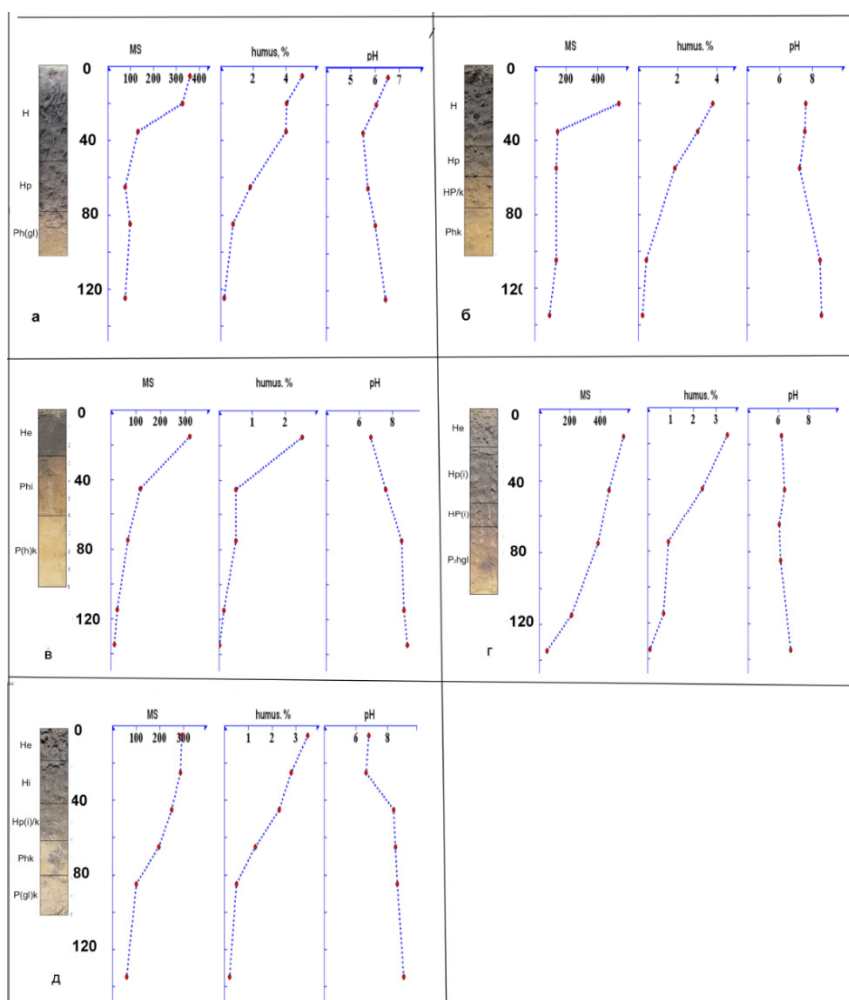


Рис. 3. Схематичний опис та досліджувані характеристики ґрунтових розрізів ділянки 2:

а – лучно-чорноземний (опідзолений) глибоко-слабоосолоділий важкосуглинковий; б – чорнозем опідзолений важкосуглинковий на лесі; в – дерновий опідзолений глеюватий легкосуглинковий; г – чорноземно-лучний слабосолонцюватий легкосуглинковий; д – лучно-чорноземний слабосолонцюватий легкосуглинковий на лесі

Таблиця 5

Значення кореляції Спірмена між досліджуваними показниками ділянки 2, (n = 27, p < 0,05)

Показники	МС	Уміст гумусу	Уміст фіз. глини	pH
МС	-	0,779	-0,069	-0,368
Уміст гумусу	0,779	-	0,598	-0,547
Уміст фіз. глини	-0,069	0,598	-	-0,352
pH	-0,368	-0,547	-0,352	-

Слід відзначити доволі високу кореляцію між МС та вмістом гумусу. Взагалі, у даному варіанті саме вміст гумусу є ключовою ланкою зв'язку – спостерігається доволі значний коефіцієнт r зі всіма дослідженими показниками.

За формулою отримання КВАГ було обчислено значення цього показника для окремих генетичних горизонтів. Якщо для верхніх горизонтів зв'язку між КВАГ та КВАМС не виявлено, то при аналізі усіх проб було отримано $r=0,61$, що нижче, ніж аналогічні показники для ґрунтового покриву ділянки 1. Проте високий ступінь зв'язку між вмістом гумусу та МС, а також середній між КВАГ та КВАМС дозволяє зробити припущення про перспективність заміщення визначення вмісту гумусу для виявлення процесів педогенезу.

Висновки. Геофізичні методи, передусім магнітні, мають значні перспективи застосування у ґрунтознавчих дослідженнях. На прикладі опідзолених ґрунтів Харківщини показано можливість індикації прояву гідроморфних процесів у нижній частині ґрунтового профілю (зниження значень МС порівняно з фоновими). На прикладі ріллі показано можливість заміни вартісного визначення вмісту гумусу на більш дешеве вимірювання МС при визначенні показників еколого-генетичного статусу ґрунту (КВАГ). Коефіцієнт кореляції між показниками КВАГ та КВАМС досягає у наших дослідках $r=0,901$, що, на нашу думку, дозволить більш широко застосовувати магнітні методи при проведенні ґрунтових обстежень.

Список використаних джерел

- Водяницький, Ю.Н. (1989). Оксиди заліза та їх роль в плодородії ґрунту. М.: Наука.
- Вывжа, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, І.І. (2017). Петрофізичні особливості порід майкопської серії Кримсько-Чорноморського регіону. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79, 12–20.
- Круглов, О.В., Панасенко, Є.В., Залавський, Ю.В., Лебедь, В.В., Афанасьєв, Ю.О., Назарок, П.Г. (2019). Магнітна сприйнятливості чорноземних ґрунтів Харківської області та її діагностичне значення. *Вісн. Аграрної науки*, 10, 12–17.
- Круглов, О.В. (2012). Особливості розподілу магнітної сприйнятливості чорнозему типового на схилах. *Вісник Харківського нац. аграрного ун-ту*, 4, 66–69.
- Круглов, О., Меньшов, О., Назарок, П., Коляда, Л., Коляда, В., Ачасов, А. (2019). Магнітна сприйнятливості ґрунтів у складі ерозіозначних досліджень. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 85(2), 35–39.
- Круглов, О., Меньшов, О., Улько, Э., Кучер, А., Назарок, П. (2018). Індикація ерозійних процесів у ґрунтового покриву Харківської області за магнітними даними. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 82(3), 36–44.
- Куценко, М.В., Тімченко, Д.О. (2016). Теоретичні основи організації системи охорони ґрунтів від ерозії в Україні. Харків: Мська друкарня.
- Лакін, Г. (1990). Біометрія. М.: Высшая школа.
- Лебедь, В.В., Соловей, В.Б. (2019). Кількісна діагностика ґрунтів різного ступеня гідроморфності на однолесових терасах річок Лівобережного Лісостепу України. *Агрохімія і ґрунтознавство. Міжвід. тем. наук. збірник*, 88, 22–23.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Меньшов, О., Сухорада, А. (2017). Основи теорії та методології геофізики ґрунтового покриву: перші результати практичного застосування. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 79(4), 35–39.
- Меньшов, О.І. (2016). Застосування магнітних методів для контролю змін продуктивних земель. *Геофізичний журнал*, 38(4), 130–137.
- Назарок, П.Г., Круглов, О.В., Куценко, М.В., Меньшов, О.І., Сухорада, А.В. (2015). До проблеми картографування ерозійних процесів. *Вісник аграрної науки*, 9, 63–68.
- Полупан, М.І., Соловей, В.Б., Величко, В.А. (2005¹). Класифікація ґрунтів України. К.: Аграрна наука.
- Полупан, М.І., Соловей, В.Б., Кисіль, В.І., Величко, В.А. (2005²). Визначник еколого-генетичного статусу та родючості ґрунтів України. К.: Колобій.
- Соловей, В.Б. (2016). Підвищення інформативності ґрунтового-картографічних матеріалів – пріоритетний напрямок розвитку ґрунтознавства. *Вісник аграрної науки*, 10, 11–16.
- Сухорада, А.В. (2001). Агрогеофізика – ідеологія, концептуальна основа, стан та перспективи розвитку. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 19, 58–64.
- Сухорада, А.В., Бондар, К.М., Круглов, О.В., Матвіїшина, Ж.М., Меньшов, О.І. (2005). Магнітні властивості ґрунтів та їх положення в ландшафті. *Фіз. географія та геоморфологія: міжвідом. наук.*, 49, 36–43.
- Шепель, С.І., Сухорада, А.В., Тютюнник, Д.А. (2001). Про педофізичні особливості деяких зональних і гідроморфних ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 19, 65–69.
- Evans, M., Heller, F. (2003). Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. *Elsevier*, Vol. 86.

- Falshtynskyi, V., Saik, P., Lozynskyi, V., Dychkovskyi, R., Petlovanyi, M. (2018). Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 68–75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>
- Gadirov, V.G., Eppelbaum, L.V., Kuderavets, R.S., Menshov, O.I., Gadirov, K.V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66(6), 1463–1483.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Tustanovska, L., Yanchenko, V., Kravchenko, D. (2019). Paleogeography and neotectonics of Kaniv dislocations (Ukrainian Shield, Ukraine) in the Neogene-Quaternary period. *Historical Biology*, 1–9. DOI: 10.1080/08912963.2019.1665039
- Jakšák, O., Kodešová, R., Kapička, A., Klement, A., Fér, M., Nikodem, A. (2016). Using magnetic susceptibility mapping for assessing soil degradation due to water erosion. *Soil and Water Research*, 11(2), 105–113.
- Menshov, O., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., & Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1–10.
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Stud. Geophys. Geod.*, 62, 681–696.
- Peluco, R.G., Marques J.J., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., Barbosa, R.S., Teixeira, D.B., Adame, C.R., Cortez, L.A. (2013). Suscetibilidade magnetica do solo e estimar da capacidade de suporte a aplicacao de vinhaia. *Pesq. Agropec. Bras.*, 48, 661–672.
- Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>
- Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36, 5, 394–405.
- Santos, H.L., Marques Júnior, J., Matias, S.S.R., Siqueira, D.S., Martins Filho, M.V. (2013). Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. *Engenharia, Agrícola*, 33(1), 64–74.
- Wang, H., Huo, Y., Zeng, L., Wu, X., Cai, Y. (2008). A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, southwest China. *J. Paleolimnol.*, 40, 897–921.
- #### References
- Evans, M., Heller, F. (2003). Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics. *Elsevier*. Vol. 86.
- Falshtynskyi, V., Saik, P., Lozynskyi, V., Dychkovskyi, R., Petlovanyi, M. (2018). Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 68–75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>
- Gadirov, V.G., Eppelbaum, L.V., Kuderavets, R.S., Menshov, O.I., Gadirov, K.V. (2018). Indicative features of local magnetic anomalies from hydrocarbon deposits: examples from Azerbaijan and Ukraine. *Acta Geophysica*, 66(6), 1463–1483.
- Ivanik, O., Shevchuk, V., Tustanovska, L., Yanchenko, V., Kravchenko, D. (2019). Paleogeography and neotectonics of Kaniv dislocations (Ukrainian Shield, Ukraine) in the Neogene-Quaternary period. *Historical Biology*, 1–9. DOI: 10.1080/08912963.2019.1665039
- Jakšák, O., Kodešová, R., Kapička, A., Klement, A., Fér, M., Nikodem, A. (2016). Using magnetic susceptibility mapping for assessing soil degradation due to water erosion. *Soil and Water Research*, 11(2), 105–113.
- Kruglov, O. (2012). Characteristics of the distribution of the magnetic susceptibility of typical chernozems on the slopes. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho ahramoho universytetu*, 4, 66–69. [in Ukrainian]
- Kruglov, O., Menshov, O., Nazarov, P., Kolyada, L., Kolyada, V., Achachov, A. (2019). Magnetic susceptibility of soils in erosion studies. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 85 (2), 35–39. [in Ukrainian]
- Kruglov, O., Menshov, O., Ulko, E., Kucher, A., Nazarov, P. (2018). Soil erosion indication by magnetic methods in Kharkiv region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 82(3), 36–44. [in Ukrainian]
- Kruglov, O.V., Panasencko, E.V., Zalavsky, Yu.V., Lebed', V.V., Afanasyev, Yu.O., Nazarov P.G. (2019). Magnetic susceptibility of chernozem soils of Kharkiv region and its diagnostic value. *Bull. Agrarian Science*, 10, 12–17.
- Kutsenko, M.V., Timchenko, D.O. (2016). Theoretical bases of soil protection against erosion in Ukraine. Kharkiv. [in Ukrainian]
- Lakin, G. (1990). Biometrics. Moscow: Vysshaya shkola. [In Russian]
- Lebed', V.V., Solovey, V.B. (2019). Quantitative diagnostics of soils of different degree of hydromorphism on single-terraced terraces of the rivers of the Left-bank Forest Steppe of Ukraine. *Agrochemistry and Soil Science. Interspace topics of sciences collection*, 88, 22–23. [in Ukrainian]
- Menshov, O., Spassov, S., Camps, P., Vyzhva, S., Pereira, P., Pastushenko, T., & Demidov, V. (2020). Soil and dust magnetism in semi-urban area Truskavets, Ukraine. *Environmental Earth Sciences*, 79, 1–10.
- Menshov, O., Kruglov, O., Vyzhva, S., Nazarov, P., Pereira, P., Pastushenko, T. (2018). Magnetic methods in tracing soil erosion, Kharkov Region, Ukraine. *Stud. Geophys. Geod.*, 62, 681–696.
- Menshov, O. (2018). The role of magnetotactic bacteria in formation of natural magnetism of Ukraine soils. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80(1), 40–45.
- Menshov, O., Sukhorada, A. (2017). Basic theory and methodology of soil geophysics: the first results of application. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79(4), 35–39.

Menshov, O.I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. *Geofizicheskii Zhurnal*, 38(4), 130-137.

Nazarok, P.H., Kruhlov, O.V., Kutsenko, M.V., Menshov, O.I., Sukhorada, A.V. (2015). On the problem of mapping of erosion processes. *Bulletin of Agricultural Science*, 9, 63-68. [in Ukrainian]

Peluco, R.G., Marques, J.J., Siqueira, D.S., Pereira, G.T., Barbosa, R.S., Teixeira, D.B., Adame, C.R., Cortez, L.A. (2013). Suscetibilidade magnetica do solo e estimaro da capacidade de suporte a aplicacao de vinhaia. *Pesq. Agropec. Bras.*, 48, 661-672.

Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskyi, V., Popovych, V., Sai, K., Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24-38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>

Polupan, M.I., Solovey, V.B., Kisil, V.I., Velichko, V.A. (2005). Determinant of ecological-genetic status and soil fertility of Ukraine. K.: Kolobig. [in Ukrainian]

Polupan, M.I., Solovey, V.B., Velichko, V.A. (2005). Soil classification of Ukraine. K.: Agricultural science. [in Ukrainian]

Prodaivoda, G. T., Vyzhva, S. A., Khoroshun, L. P., Nazarenko, L. V. (2000). Mathematical modeling of the azimuthal anisotropy in thermoelastic properties of the oceanic upper mantle. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 36, 5, 394-405.

Santos, H.L., Marques Júnior, J., Matias, S.S.R., Siqueira, D.S., Martins Filho, M.V. (2013). Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. *Engenharia, Agrícola*, 33(1), 64-74.

Shepel, S.I., Sukhorada, A.V., Tyutyunnik, D.A. (2001). About petrophysical features of some zonal and hydromorphic soils of Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 19, 65-69. [in Ukrainian]

Solovey, V.B. (2016). Increasing the informativeness of soil-mapping materials is a priority direction for the development of soil science. *Bulletin of Agrarian Science*, 10, 11-16. [in Ukrainian]

Sukhorada, A., Bondar, K., Kruglov, O., Matviyishyna, Zh., Menshov, O. (2005). Magnetic properties of soils and their position in the landscape. *Fizychna heohrafiya ta heomorfolohiya: mizhvidomchyy naukovy zbirnyk*, 49, 36-43. [in Ukrainian]

Sukhorada, A.V. (2001). Agroteophysics - ideology, conceptual basis, state and prospects of development. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 19, 58-64. [in Ukrainian]

Vodyanitskiy, Yu.N. (1989). Iron oxides and their role in soil fertility. Moscow: Nauka. [in Russian]

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]

Wang, H., Huo, Y., Zeng, L., Wu, X., Cai, Y. (2008). A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, southwest China. *J. Paleolimnol.*, 40, 897-921.

Надійшла до редколегії 19.12.19

O. Kruglov¹, PhD (Geol.), Senior Researcher

E-mail: alex_kruglov@ukr.net;

O. Menshov², Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher

E-mail: menshov.o@ukr.net;

V. Solovey¹, PhD (Agri.);

V. Lebed¹, Researcher;

O. Andreeva², PhD (Geol.), Researcher;

¹NSC "Institute for Soil Science and Agrochemistry Research n. a. O.N. Sokolovskiy",

4 Chaikovska Str., Kharkiv, 61024, Ukraine;

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,

90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

CHERNOZEM SOIL GENETIC FEATURES DIAGNOSIS WITH MAGNETIC METHODS

The ecological-genetic status of soil is determined by the course of the soil-forming process and is the main factor in optimizing the agricultural use to achieve a sustainable state. The definition of a qualitative indicator of this status (KVAG) is developed in Ukraine and is characterized as costing and resource intensive. To solve the problem, it is proposed to replace agrochemical methods with less costly magnetic ones. The purpose of the study is to show the informativeness of geophysical methods for the indication of the process of pedogenesis on the example of chernozems podzolized of Kharkiv region. We used the standardized studies of determination of organic carbon content, determination of the particle size distribution of soil, and pH analysis. The characteristic of the sampling site on the slope was performed by determining the erosion hazard index. The mass-specific magnetic susceptibility of soil (MS) was determined and then calculated. The study sites were located at the area of distribution of chernozems podzolized in the northern part of Kharkiv district and the central part of Pechenig district of Kharkiv region. Soil genetic identity has been determined initially at the large-scale survey map and refined by field studies. The erosion processes complicated the soil study at the slope. We registered high informativeness of MS for the indication of genetic status. MS is relevant to use not only within a single agrocenosis, but also in agrolandscapes for soils which pedogenesis is complicated by hydromorphism. The experiment was performed at one-lane terrace of the Siverskyi Donets River, where soils of varying degrees of hydromorphism are developed. Magnetic methods have significant outlook for their application in soil studies. The example of the podzolized soils investigation of Kharkiv region shows the possibility of the identification of hydromorphic processes in the lower part of the soil profile (decrease of the values of MS compared to the background). The example of the arable land shows the possibility of replacing the high-cost determining of the humus content by much cheaper MS as the indicator of ecological-genetic status of soil (KVAG). The correlation coefficient between the KVAG and KVAMS (based on the MS measuring) is: $\rho = 0.901$.

Keywords: soil, magnetic susceptibility, slope, humus, hydromorphism.

A. Круглов¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотруд.

E-mail: alex_kruglov@ukr.net;

A. Меньшов², д-р геол. наук, ст. науч. сотруд.

E-mail: menshov.o@ukr.net;

B. Соловей¹, канд. с-х. наук;

B. Лебедь¹, науч. сотруд.;

E. Андреева², канд. геол. наук, научн. сотр.

¹ННЦ "Інститут почвознавства і агрохімії імені А.Н. Соколовського",

ул. Чайковська, 4, Харків, 61024, Україна;

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, Київ, 03022, Україна

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ МЕТОДАМИ МАГНИТОМЕТРИИ

Эколого-генетический статус почвы определяется ходом процесса почвообразования и является решающим фактором при оптимизации его сельскохозяйственного использования для достижения устойчивого состояния. Определение разработанного в Украине качественного показателя такого статуса (КВАГ) характеризуется высокими затратами ресурсов и труда. Для решения проблемы предлагается замена агрохимических методов исследований на менее дорогие магнитные анализы. Цель исследования – показать информативность геофизических методов для индикации процесса педогенеза на примере черноземов оподзоленных Харьковской области. Использованы стандартизированные исследования определения содержания органического углерода, гранулометрического состава, pH. Характеристику места отбора проб на склоне проводили с помощью определения индекса эрозийной опасности. Был проведен отбор образцов и измерение в лабораторных условиях удельной магнитной восприимчивости почвы (МВ). Опытные участки были расположены в ареале распространения черноземов оподзоленных, в северной части Харьковского района и центральной части Печенежского района Харьковской области. Генетическая характеристика почвы была предварительно определена по картам крупномасштабного обследования и уточнена полевыми исследованиями. Для почв склона, осложненных эрозийными процессами, наблюдается зависимость МВ от генетического статуса. Это позволяет использовать МВ не только в рамках одного агроценоза, но и в смежных агроландшафтах для почв, развитие которых затруднено гидроморфизмом. Опыт был проведен на однолесовой террасе р. Северский Донец, где развиты почвы разной степени гидроморфности. На примере оподзоленных почв Харьковской области показана возможность индикации проявления гидроморфных процессов в нижней части почвенного профиля. Зафиксировано снижение значений МВ по сравнению с фоновыми. На примере пашни показана возможность замены дорогого определения содержания гумуса более дешевой МВ при определении показателей эколого-генетического статуса почвы. Коэффициент корреляции между показателями КВАГ и КВАМС (замена определения гумуса на МВ) составил $\rho=0,901$.

Ключевые слова: почва, магнитная восприимчивость, склон, гумус, гидроморфизм.

УДК 550.838+504.054

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.10>К. Бондар¹, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,E-mail: ks_bondar@ukr.net;А. Сачко², канд. хім. наук, доц.,E-mail: an.sachko@chnu.edu.ua;І. Цюпа¹, інж. 1 кат.,E-mail: tsyupa@ukr.net;¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58012, Україна

ОЦІНКА АНТРОПОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ВІДКЛАДІВ МІСТА ЧЕРНІВЦІ ЗА МАГНІТНОЮ СПРИЙНЯТЛИВІСТЮ ТА ВМІСТОМ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ

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

Досліджено просторовий розподіл питомої магнітної сприйнятливості (χ) поверхневих відкладів міста Чернівці та висвітлено її інформативність як індикатора геохімічного забруднення ґрунтового покриву. Вивчалися валовий вміст важких металів у ґрунтах міста та кореляційні зв'язки між частотною залежністю магнітної сприйнятливості ($K_{\text{д}}$) й вмістом Cd, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn.

Встановлено, що значення χ змінюються від $10 \cdot 10^{-8}$ до $1286 \cdot 10^{-8}$ м³/кг при медіанному значенні $66 \cdot 10^{-8}$ м³/кг. У 20 % зразків медіана перевищує втричі і більше, що свідчить про забруднення ґрунтів міста залізовмісним пилом і твердими магнітними частинками у складі техногенних аерозолів. Пріоритетними забруднювачами ґрунтів міста є такі метали, як Pb та Zn, вміст яких перевищує ГДК для переважної більшості зразків.

Кореляційні зв'язки χ з Pb та Zn характеризуються як сильні, з Cu та Cd – як слабші, але все ж статистично значущі. Додатковим критерієм спільного техногенного походження важких металів і магнітних мінералів у ґрунтах є значущі негативні коефіцієнти кореляції між $K_{\text{д}}$ та вмістом Zn, Pb, Cu. Тобто можна стверджувати, що зростання концентрації Zn, Pb та Cu супроводжується зростанням кількості магнітних мінералів у багатодоменому стані.

Побудовано картосхеми розподілу χ і показника накопичення забруднення PLI, обрахованому по трьох металах (Zn, Pb та Cu).

Для 51 % зразків значення PLI свідчить про відсутність забруднення, для 35 % – про помірне забруднення, 14 % – дуже сильне забруднення ґрунтів. Ці дані вказують на те, що поверхневі відклади великої частини міста потребують впровадження заходів зі зниження їх токсичності.

Коефіцієнт кореляції між χ та PLI становить 0,88, що свідчить про ефективність використання χ як експрес-індикатора геохімічного забруднення важкими металами ґрунтів м. Чернівці.

Ключові слова: ґрунт, магнітна сприйнятливість, важкі метали, показник накопичення забруднення, Чернівці.

Вступ. Оцінка негативних наслідків антропогенного забруднення ґрунтів урбанізованих територій на сьогодні є актуальним завданням. Серед найшкідливіших для довкілля і здоров'я людини є забруднення ґрунтів важкими металами. Зростання обсягів викидів в атмосферне повітря сприяє забрудненню міських ґрунтів, які є важливим системотвірним компонентом природного середовища міста.

Інформативним показником техногенного навантаження на ґрунтовий покрив урбанізованих територій може бути питома магнітна сприйнятливість (χ), що характеризує концентрацію магнітних мінералів у ґрунті. Зростання χ ґрунтів, яке спостерігається в місті, спричинене переважно дрібними частинками з розмірами <10 мкм (PM10), емітованими в повітря автотранспортом та промисловими підприємствами (Hanesch and Scholger, 2002). У складі твердої фракції пило-газових викидів і аерозолів знайдений магнетит (Sukhorada et al., 2004; Jelenska et al., 2004), дорожній бруд і смог містять магнетит та металічне залізо (Muxworthy et al., 2002). У ґрунтах і бруді мегаполісів доведений сильний кореляційний зв'язок між χ та вмістом поліциклічних ароматичних вуглеводнів (Xie et al., 1997 та ін.), χ та вмістом важких металів. PM10, потрапляючи в організм людини під час дихання, зумовлюють серйозний ризик для здоров'я (Guthrie, 1995).

Позитивна кореляція між вмістом важких металів у ґрунтах промислових територій і їх χ встановлена багатьма авторами, що пояснюється адсорбцією важких металів на поверхні твердих частинок аерозолів (Spasov et al., 2000; Sukhorada та ін., 2004; Matasova et al., 2001; Водяницький та Добровольський, 1998 та ін.).

Найбільш забрудненими у містах визнані придорожні території та промзони (Lu and Bai, 2006), результати картування ґрунтів по магнітній сприйнятливості свідчать

про підвищення цього параметра у 100 разів порівняно із сільською місцевістю (Shi and Cioppa, 2006).

В українських містах, які не є потужними промисловими центрами, також часто спостерігаються високі рівні забруднення ґрунтів важкими металами. Так, дослідження, проведені у Тернополі, показали присутність у ґрунтах Pb, Cu, Ni, а місцями – Mo та Cr, однак вміст усіх металів, окрім свинцю, не перевищував гранично допустимі концентрації (ГДК) (Кураєва, 2012). Для Чорткова, забруднювачами є ті самі Pb, Cu, Ni, але ще додається Mn, причому концентрація всіх металів перевищує ГДК (Кураєва, 2012). Для ґрунтів Придністров'я базовими забруднювачами були Pb, Cu, Ni та Cr (Кураєва, 2012), а для міста Луцьк – Pb, Cu, Co та Cd (Фесюк, 2007). ґрунти Одеси забруднені важкими металами, які формують геохімічну асоціацію Pb-Cu-Zn (Старих, 2017).

Метою роботи стало дослідження χ і вмісту важких металів у ґрунтах міста Чернівці, встановлення статистичних зв'язків між ними та визначення інформативності комплексування магнітного та геохімічного методів у контексті екологічного контролю.

Територія дослідження. Загальна площа Чернівців в адміністративних межах становить (станом на 2013 р.) близько 153 км². Відповідно до функціонального призначення землі міста розподілені таким чином: землі житлової та громадської забудови (64 %), землі сільськогосподарського призначення (17 %), землі промислового призначення (9 %), землі рекреаційного та природоохоронного призначення (5 %), землі загального користування (3 %), землі комерційного призначення (2 %) (Стратегічний план розвитку міста ..., 2012).

Головною водною артерією Чернівців є річка Прут у її верхній течії, яка розділяє місто навпіл. Крім того, населеним пунктом протікає шість малих річок-струмків, у межах міста розташовані дев'ять озер.

Рельєф характеризується значними перепадами – від 150 м над рівнем моря у долинах Пруту до 537 м на західних околицях (гора Цецино), що зумовлено розташуванням міста на пагорбах Чернівецької височини.

Хоча вважається, що Чернівці не є індустріальним містом, насправді, у Чернівецькій області сформований достатньо великий промисловий комплекс, до складу якого, станом на 2018 рік, входять підприємства: хімічної промисловості (5 діючих виробництв), харчової промисловості (15 підприємств, що представляють різні галузі харчових виробництв), легкої промисловості (17 різноманітних підприємств), а також машинобудування, деревообробної, металообробної та інших галузей (*Каталог промислових підприємств..., н.д.*).

Упродовж 2017 р. в атмосферу міста викинуто 1,11 тис. т забруднювальних речовин, (*Регіональна доповідь..., 2018*).

Значна частина промислової зони міста зосереджена в долині р. Прут. Там само розташований колійний вузол, залізнична станція Чернівці та головні автомагістралі міста. Очевидно, що не лише скупчення промислових підприємств, а й рельєф міста буде суттєво впливати на розподіл забруднювальних речовин у ґрунтах.

Ще одним важливим фактором забруднення, яким неможливо нехтувати, є потужний, як для такого невеликого міста автомобільний рух. Транспортний комплекс міста складається з автомобільного, залізничного та електричного (тролейбуси) видів транспорту. Найбільший обсяг пасажирських та вантажних перевезень припадає на автомобільний транспорт. За даними (*Соціально-економічний аналіз..., 2019*), у період з 2012 по 2018 р. суттєво впала частка вантажопасажирських перевезень залізничним транспортом і, відповідно, зріс внесок автомобільних перевезень. З одного боку, інтенсифікація автомобільного руху не мала б прямо впливати на вміст важких металів у ґрунтах, оскільки використання етилованих бензинів, які є прямими забруднювачами доквілля сполуками свинцю, заборонено в Україні з 1 січня 2003 р. З іншого, зростання кількості автомобілів, порушення правил паркування, що веде до зменшення кількості зелених насаджень, спричинює руйнування верхнього шару ґрунтового покриву та підвищене пилоутворення.

Враховуючи той факт, що Чернівці – одне з небагатьох міст в Україні, яке не має повноцінної об'їзної дороги, велика частина автомобільного трафіку проходить через місто, особливо це стосується районів, де проводився відбір зразків для аналізу. Оскільки основним джерелом забруднення повітря в Чернівцях та області є саме викиди від пересувних джерел забруднення (90,6 % від загальної кількості викидів станом на 2015 р.), зменшення транзиту транспорту через місто могло б суттєво поліпшити екологічні показники. Варто зазначити, що Чернівецька область має найменші показники викидів в атмосферне повітря порівняно із сусідніми областями (*Соціально-економічний аналіз..., 2019*).

Методи досліджень. Зразки ґрунтів для визначення вмісту важких металів та дослідження магнітних характеристик відбирали відповідно до вимог (*Охорона довкілля..., н.д.*), у рамках багаторічного контролю за забрудненням територій важкими металами, що здійснюється ЦГО ДСНС України. У місті Чернівці було відібрано 55 ґрунтових зразків на територіях, прилеглих до вулиць Хотинської та Головної, які проходять крізь усе місто та захоплюють частину промислових об'єктів.

Для визначення концентрацій важких металів (Cd, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn) у зразках використано методи атомно-емісійного (спектрограф СТЕ-1, лабораторія Центральної геофізичної обсерваторії) та атомно-абсорбційного

спектрального аналізу (атомно-абсорбційний спектрофотометр С-115, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича).

На зразках ґрунтів у лабораторних умовах за допомогою приладу Bartington MS2 з датчиком MS2B Dual Frequency Sensor (Велика Британія) виміряно магнітну сприйнятливість на частоті 470 Гц (k_{LF}) та 4700 Гц (k_{HF}). Питомою магнітною сприйнятливості (χ) обрахована як відношення k_{LF} до маси зразка, вона є показником концентрації феримагнітних мінералів, у першу чергу оксидів заліза.

Частотну залежність магнітної сприйнятливості (k_{fd}) було обраховано за формулою

$$k_{fd}(\%) = (k_{LF} - k_{HF}) / k_{LF} * 100\%.$$

k_{fd} чутлива до вмісту дрібнодисперсних суперпарамагнітних часток (розмір <30 нм) (*Dearing, 1999*) і показує наявність у ґрунтах суперпарамагнітного матеріалу. Для чистих поверхневих відкладів Лісостепу і Степу України k_{fd} становить 8–13 % (*Jeleńska, 2008*), для техногенно забруднених аналогів зазвичай <5 % (*Jeleńska, 2004*). Отже, аеротехногенне забруднення сприяє зменшенню k_{fd} .

Результати та обговорення. *Актуальна кислотність* переважної кількості зразків коливалась у діапазоні 6,6–6,8 одиниць рН (рис. 1). Лише 6 зразків мали кислотність нижчу за 6 одиниць. Варто зазначити, що не знайдено залежності між місцем відбору та кислотністю: низьку кислотність показали зразки, відібрані в географічно віддалених між собою ділянках міста. Відомо, що актуальна кислотність суттєво впливає на форми існування та міграцію важких металів у ґрунтового розчині. Рухливість металів у ґрунті суттєво залежить від присутності в них оксидів та гідроксидів Fe, Al та Mn. Вони здатні зв'язувати катіони важких металів шляхом ізоморфного заміщення іонів ґратки на досліджувані іони. Окрім того, досліджувані метали здатні утворювати нерозчинні гідроксиди, отже, можна очікувати, що з пониженням рН їх міграційна здатність покращується. У кислом середовищі важкі метали зв'язуються переважно в розчинні орґано-мінеральні комплекси.

Зважаючи близький до нейтрального рН ґрунтів міста, можна очікувати, що важкі метали входять до відносно стабільних сполук, які характеризуються поганою міграційною здатністю та можуть довго зберігатись у складі ґрунту.

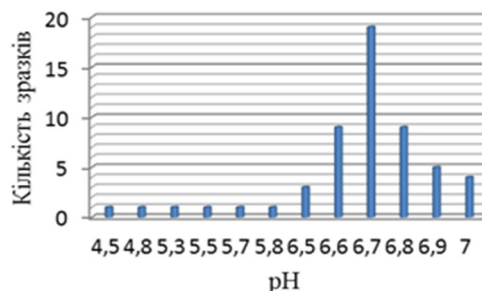


Рис. 1. Розподіл відібраних зразків за значеннями рН

Вміст важких металів (Cd, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn).

Важкі метали переважно накопичуються у верхньому гумусному горизонті. Загалом глибина проникнення важких металів у ґрунт не перевищує 20 см, проте при сильному забрудненні ця величина може зрости до 160 см. З досліджених металів найбільшою міграційною здатністю характеризується Zn (0–25 см), найменшою – Pb, який найчастіше накопичується в поверхневому шарі (0–2,5 см) (*Мальцева, 2016*). За визначеннями Всесвітньої організації охорони здоров'я найнебезпечнішими важкими металами з шести досліджених визнано Cd, Zn та Pb. Ці метали відносять до першого класу небезпеки.

До другого класу небезпеки відносять Cu та Ni, а до третього – Mn (Охорона довкілля, 2019). Після потрапляння в ґрунт важкі метали, особливо їх рухомі форми, здатні до різноманітних трансформацій: взаємодії з органічними компонентами, утворення стійких сполук з гумусом, адсорбція на частинках ґрунту тощо.

Базуючись на одержаних даних, було побудовано діаграми коливання вмісту важких металів у досліджених зразках та визначено максимальний і мінімальний вміст компонентів.

Після аналізу одержаних результатів та порівняння їх зі значеннями ГДК для досліджуваних металів (Якість ґрунту..., 2005) встановлено наступне.

Хоча деякі автори (Руденко, 2003) вважають, що природний вміст сполук мангану в ґрунтах Чернівців та області є високим і значення ГДК є дещо заниженими, у жодному з досліджуваних зразків вміст Mn не перевищував ГДК, яка становить 1500 мг/кг ґрунту (рис. 2). Забруднення зразків Ni так само не було виявлено: лише два зразки (4 %), показали перевищення гранично допустимої концентрації Ni (ГДК_{Ni} = 85 мг/кг).

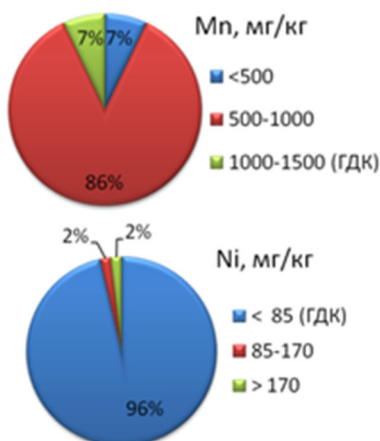


Рис. 2. Вміст Mn та Ni у ґрунтових зразках міста Чернівці

Для 91 % досліджених зразків вміст Cd не перевищував ГДК (1 мг/кг), для 5 % – незначно перевищував і для 2 % – перевищував більше, ніж вдвічі (рис. 3). Вміст Cu в аналізованих ґрунтах перевищував ГДК у 29 % зразків, з них у 18 % зразків – перевищував у 2 та більше разів.

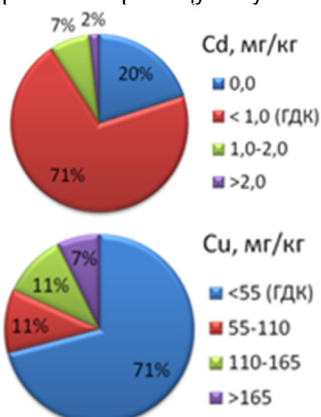


Рис. 3. Вміст Cd та Cu у ґрунтових зразках міста Чернівці

Значно гірша ситуація спостерігається зі вмістом Pb та Zn. Ці речовини є високотоксичними, а в більшості зразків спостерігалось суттєве перевищення їх концентрацій, порівняно із гранично допустимими (ГДК_{Pb} = 32 мг/кг, ГДК_{Zn} = 100 мг/кг). Так, для 20 зразків вміст Pb

не перевищував ГДК, для 15 – перевищував незначно, для решти – перевищував у рази.

Схожа ситуація спостерігалась із Zn, концентрація якого лише у 10 зразках була в межах норми, для решти – сильно перевищувала гранично допустимий вміст. Варто зазначити, що в зразках з дуже високою концентрацією Pb, концентрація Zn теж перевищувала допустимі норми (рис. 4).

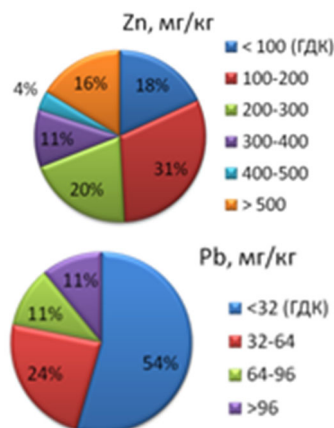


Рис. 4. Вміст Zn та Pb у ґрунтових зразках міста Чернівці

Найгіршими показниками володіє зразок № 15, відібраний на вул. Заводській, 11-а, неподалік від залізничної станції "Чернівці-Північна". Вміст досліджуваних металів у ньому (окрім Zn) суттєво перевищував ГДК. Так, для C(Cd) = 2,5 ГДК; C(Mn) = 0,48 ГДК; C(Cu) = 5,53 ГДК; C(Ni) = 1,13 ГДК; C(Pb) = 30,84 ГДК; C(Zn) = 7,87 ГДК.

Найчистішим виявився зразок № 7, відібраний біля автостанції № 2 по вул. Фастівській. Така картина не є несподіваною: місце відбору першого зразка розташоване недалеко від колій та території заводу, а другого – на краю міста.

Одержані нами результати добре вписуються у відомості, отримані іншими авторами. З одного боку, на території Чернівців не має металургійних комбінатів та підприємств, які спричинили б такий високий вміст цинку та свинцю. З іншого боку, відомо, що суттєвим забруднювачем саме цими металами виступає залізниця та сусідство із завантаженими автошляхами. Так, згідно з (Бобрик, 2015), за перевищенням вмісту в ґрунтах при залізничних територіях метали можна розташувати в такий ряд: Zn = Ni > Pb > Cu. Причому високий рівень забруднення зберігається не лише у середній частині близькості до колій, а й на відстанях до 250 м від неї. Не дуже сприятлива ситуація з цими забруднювачами спостерігається і біля автошляхів. Так, у роботі (Грабовський, 2002) виділяють чотири області накопичення важких металів, залежно від відстані до автомагістралі: ділянка інтенсивного забруднення – 0–50 м від полотна дороги, де осідає до 75 % важких металів; середнього забруднення – 50–100 м від полотна дороги – до 20 % важких металів; слабого забруднення – 100–200 м від полотна дороги; відносно чиста ділянка – понад 200 м від полотна дороги, де вміст важких металів варіює в межах фонових величин. Оскільки більшість місць відбору розташовані вздовж головної вулиці міста та неподалік залізничної колії, перевищення вмісту цинку та свинцю є очікуваними.

Магнітні властивості. Магнітна сприйнятливості ґрунтів міста змінюється в межах від $10 \cdot 10^{-8}$ до $1286 \cdot 10^{-8}$ м³/кг при медіанному значенні $66 \cdot 10^{-8}$ м³/кг (рис. 6). Високі значення χ локалізуються поблизу підприємств та залізничних депо та станцій.

належать до Передкарпатської зони. Характерною рисою ґрунтів цієї зони є високий рівень вмісту заліза, титану та свинцю. Природні фонові вмісти сягають Pb – 61 мг/кг, Zn – 124 мг/кг, Cu – 31 мг/кг, Mn – 821 мг/кг, Ni – 47 мг/кг (Фатеев, 2003).

Порівнюючи їх з ГДК, зауважимо, що фоновий вміст цинку незначно перевищує ГДК, а фоновий вміст свинцю перевищує ГДК удвічі (!). Це свідчить про недосконалість екологічних оцінок ґрунтів, які базуються на ГДК. Не заглиблюючись до питання про необхідність перегляду норм ГДК важких металів у ґрунтах, зауважимо лише, що сучасні європейські національні стандарти базуються на фонових концентраціях елементів у ґрунті (Рубежнюк, 2018).

Найбільш широкоживим для міських територій є показник накопичення забруднення PLI (Pollution load index), запропонований Томлінсоном та співавторами (Tomlinson et al., 1980).

Цей показник розраховується як середнє геометричне коефіцієнтів концентрації n важких металів (K_c , $i = 1 \dots n$), де K_c i -го металу – це співвідношення вмісту металу в зразку до фонового вмісту, n – кількість металів:

$$PLI = \sqrt[n]{K_{c1} * K_{c2} * \dots * K_{ci}}.$$

PLI демонструє, у скільки разів концентрація важких металів у ґрунті перевищує фонову. Значення $PLI > 6$ по-

казує, що ґрунти дуже сильно забруднені, $3 < PLI < 6$ – значно забруднені, помірно забруднені ґрунти мають PLI від 1 до 3, про відсутність забруднення свідчить $PLI < 1$ (Tomlinson, 1980; Яковишина, 2016).

У нашому дослідженні для розрахунків PLI ми використали лише ті елементи, які мають статистично значущі позитивні кореляційні зв'язки з χ та негативні – з K_{nd} (Zn, Pb, Cu). Навіть якщо їх вміст у більшості зразків не досягає або не набагато перевищує ГДК, можна стверджувати про збагачення цими елементами магнітних твердих частинок у складі техногенних аерозолів, що випадають на поверхню ґрунту.

Коефіцієнт кореляції PLI та χ становить 0,88. Згідно з одержаними нами результатами середнє значення показника накопичення забруднення становить 2,7, а медіана – 0,97. Для 28 (51 %) зразків значення PLI були меншими за одиницю, що свідчить про відсутність забруднення, для 19 (35 %) становили 1,0–3,0 у.о., для 6 коливались у межах 3,0–6,0 та лише для двох перевищували 6,0 (значення $PLI = 14$ та 10 – дуже сильно забруднені).

На основі одержаних результатів було побудовано картосхему розподілу показника накопичення забруднення досліджуваної території (рис. 7). З картосхеми видно, що ґрунти призалізничних територій є найбільш забрудненими важкими металами і потребують впровадження заходів зі зниження їх токсичності.

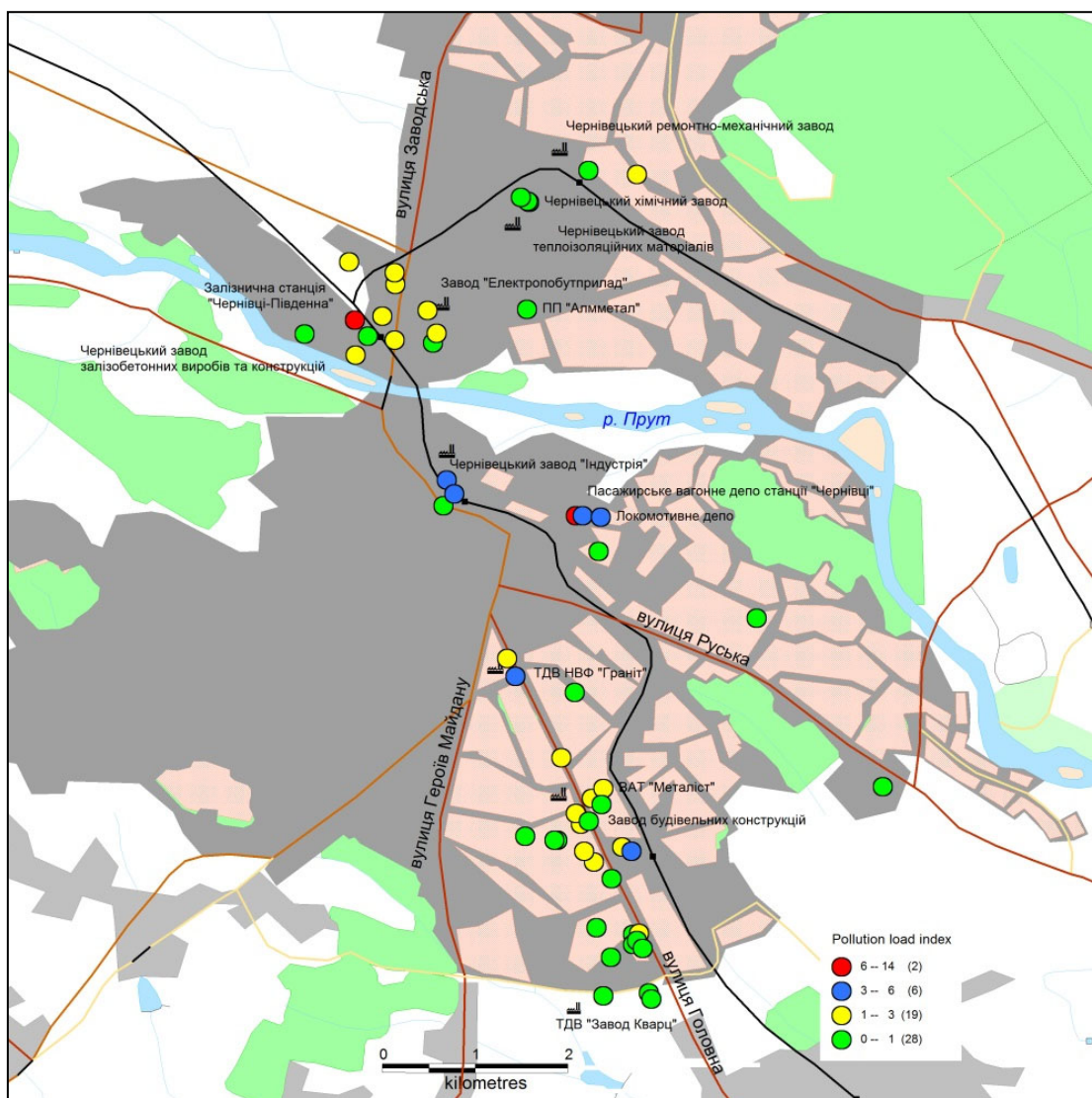


Рис. 7. Картосхема показника накопичення забруднення ґрунтів (Pollution load Index) м. Чернівці

Висновки. Пріоритетними забруднювачами ґрунтів міста є такі метали, як Pb та Zn, вміст яких перевищував ГДК у переважній більшості зразків. Однозначно важко дати вичерпну відповідь, з чим пов'язаний такий розподіл забруднювачів. Хоча більшість підприємств, розташованих у промзоні Чернівців, таких як Чернівецький хімзавод, Чернівецький олійно-жировий комбінат, Машзавод, завод з випуску гумових виробів "Розма", Чернівецька залізнична станція та інші, зменшили свою потужність, але продовжують працювати. Покращились системи очистки повітря та стічних вод, вдосконалились технології та обладнання, однак не можна однозначно стверджувати про повне припинення дії забруднювальних факторів. З іншого боку, відомо, що основними джерелами Pb та Zn є промислове машинобудування, хімічна та електрохімічна промисловість (*Соціально-економічний аналіз...*, 2019); потужним джерелом Pb був етилований бензин, використання якого заборонили в країнах ЄС ще 1 січня 2000 р. Оскільки період напіввиведення Pb з ґрунтів становить 740–5900 років, а Zn 70–510 років (*Александрова, 2001*), то можна припустити, що сучасна картина розподілу важких металів у промисловій зоні міста Чернівці є результатом багаторічної діяльності підприємств хімічної та легкої промисловості та безпосереднім сусідством цих районів міста із залізничним вузлом – станцією Чернівці та завантаженими міськими автошляхами. Крім того, промислова зона, в якій проводився відбір переважної кількості зразків, розташована в долині річки Прут, нижче за основну частину міста, що так само може бути причиною підвищеного накопичення важких металів. Одержані дані вказують на необхідність проведення постійного моніторингу антропогенного забруднення поверхневих відкладів міста Чернівці. Індекс накопичення забруднення, розрахований по Zn, Pb та Cu, показав тісний кореляційний зв'язок з магнітною сприйнятливістю. Отже, для експрес-оцінки забрудненості територій цими трьома елементами зручно використовувати магнітний метод. Він дає можливість оцінити кількість магнітної фракції, що накопичується в поверхневих відкладах міста. Саме ця фракція, яка найчастіше представлена магнетитом, що містить як сорбовані, так і структурно зв'язані іони важких металів, і є основним джерелом антропогенного забруднення ґрунтів.

Список використаних джерел

- Александрова, Э.А., Гайдукова, Н. Г., Кошеленко, Н.А. Ткаченко, З.Н. (2001). Тяжелые металлы в почвах и растениях и их аналитический контроль. Краснодар: КГАУ, 6–11.
- Бобрик, Н.Ю. (2015). Поширення та акумуляція важких металів у ґрунтах призалізничних територій. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Біологія. Екологія*, 23(2), 183–189.
- Бондар, К.М., Кураева, І.В., Войтюк, Ю.Ю., Цюпа, І.В., Стахів, І.Р., Матвієнко, О.В., Кузь, Ю.В. (2016). Комплексна еколого-геохімічна оцінка техногенно забруднених територій. *Мінералогічний журнал*, 38 (2), 88–95.
- Водяницький, Ю.Н., Добровольський, В.В. (1998). Железистые минералы и тяжелые металлы в почвах. М.: Почвенный институт им. В.В. Докучаева РАНХ.
- Гравовський, О.В. (2002). Міграція та акумуляція важких металів в агроценозах, прилеглих до автомагістралей, в умовах Закарпаття (ґрунт-рослини-тварини). Дис. ... канд. біол. наук: 03.00.16. Ужгородський національний ун-т. Ужгород.
- Ґрунти України. (н.д.). Отримано з: <http://geomap.land.kiev.ua/soil.html>
- Карта ґрунтів України. (н.д.). Отримано з: <https://www.zemo-ua.com/journals/2014/yanvar-2014-god/kartoteka-agrariya-karta-g-runtiv-ukrayini>
- Каталог промислових підприємств м. Чернівці станом на 01.01.2019. (н.д.). Отримано з <http://chernivtsy.eu/portal/katalog-tovarnoyi-produktsiyi-yaka-viroblyayet-sya-promislovimi-pidpriemstvami-mista-chernivtsi-standom-na-01-10-2012-roku>
- Кураева, І.В., Пога, І.В., Сорокіна, Л.Ю., Голубцов, О.Г. (2012). Оцінка вмісту важких металів та умов їх міграції в агроландшафтах Тернопільської області. *Український географічний журнал*, 3, 25–33.

Мальцева, І.А. (2016). Еколого-біологічна оцінка едафотопів урбоекосистем міста Маріуполя. Дис. ... канд. екол.наук: 03.00.16. "Екологія". Мелітополь.

Матасова, Г.Г., Казанский, А.Ю., Бортникова, С.Б., Айрияц, А.А. (2001). Петромагнитные исследования окружающей среды, загрязненной отходами горнорудного предприятия (г. Салаир, Западная Сибирь). В сб.: Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. М.: ГЕОС, 56–58.

Охорона довкілля. Якість ґрунту. (н.д.). Методи відбирання та підготування проб для хімічного, бактеріологічного, гельмінтологічного аналізу. ДСТУ ГОСТ 17.4.4.02:2019

Руденко, С.С., Костишин, С.С., Морозова, Т.В. (2003). Порівняльний аналіз забруднення агроландшафтів Чернівецької області важкими металами та алюмінієм. *Екологія та ноосферологія*, 14, 3–4, 73–78.

Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Чернівецької області у 2017 році. (2018). Отримано з https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2017/Reg_Dop_%20Чернівецька_2017.pdf

Соціально-економічний аналіз Чернівецької області до проекту Стратегії розвитку Чернівецької області на період до 2027 року. (2019). Отримано з <https://bukoda.gov.ua/uploads/editor/bukoda.gov.ua>

Стахів, І.Р., Бондар, К.М., Цюпа, І.В., Король, А.А. (2017). Магнітна сприйнятливість як індикатор забруднення ґрунтів викидами автотранспорту в Одесі. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 78, 46–50.

Стратегічний план розвитку міста Чернівців на 2012–2016 роки. (2012). Чернівці. Отримано з <http://chernivtsy.eu/portal/>

Фатеев, А.І., Пашенко, Я.В. (2003). Фоновий вміст мікроелементів у ґрунтах України. Харків: Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського.

Фесюк, В.О., Панькевич, С.Г. (2007). Екологічні наслідки впливу осадів стічних вод очисних споруд міста Луцька на навколишнє середовище та шляхи їх мінімізації. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 256, 286–292.

Якість ґрунту. Відбирання проб. (2005). ДСТУ 4286:2004. Київ: Держжипостандарт України.

Яковичина, Т.Ф. (2016). Індекс антропогенного навантаження на ґрунт урбоекосистем внаслідок забруднення важкими металами. *Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. "Форум аграріїв – 2016", 5–8 жовтня 2016 р., Дніпро*, 2, 224–229.

Dearing, J.A. (1999). Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 System. Kenilworth: Chi Publ.

Guthrie, G.D. (1995). Eat, breathe and wary: Mineralogy in environment health. *Reviews of Geophysics, Supplement*, 117–121.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Bondar, K., Matviishina, Zh. (2008). Magnetic structure of polluted soil profiles from Eastern Ukraine. *Acta Geophysica*, 49, 1012–1033.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K., Kądziałko-Hofmokl, M., Matviishina, Zh. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophysical Journal International*, 159 (1), 104–116.

Strzyszc, Z., Magiera, T., Heller, F. (1996) The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in upper Silesia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40, 3, 276–286.

Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffney, D.W. (1980). Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoland Marine Research*, 33 (1), 566–572.

Sukhorada, A., Bondar, K., Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Matviishina, Zh. (2004). Spatial distribution of ferrimagnetic pollution from iron-ore open-cast mines and metallurgical enterprises of Kryvyi Rig and Mariupol, *Contributions to Geophysics & Geodesy*, 34, 145–146.

Hanesch, M., Scholger, R. (2002). Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environ. Geol.*, 42, 857–870.

Muxworthy, A.R., Schmidbauer, E., Petersen, N. (2002). Magnetic properties and Mossbauer spectra of urban atmospheric particulate matter: a case study from Munich, Germany. *Geophys J. Int.*, 150, 558 - 570, ISSN: 0956-540X

Lu, S.G., Bai, S.Q. (2006). Study on correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. *J. Applied Geoph.*, 60, 1–12.

Shi, R., Cioppa, M.T., (2006). Magnetic survey of topsoils in Windsor-Essex Country, Canada. *J. Applied Geoph.*, 60, 201–212.

Xie, S., Dearing, J.A., Bloemendal, J. (1997). The organic matter content of street dust in Liverpool, UK and its association with dust magnetic properties. *Atmospheric Environment*, 34, 269–275.

Spassov, S., Zananiri, I., Koundopoulou, D., Atzemoglou, A., Polya, D. et al. (2004). Application of environmental techniques in detecting nanoparticle contamination. *Contributions to Geophysics & Geodesy*, 34, 141–143.

References

- Aleksandrova, E.A., Gajdukova, N.G., Koshelenko, N.A. Tkachenko, Z.N. (2001). Heavy metals in soils and plants and their analytical control, Krasnodar: KGAU, 6–11. [In Russian]
- Bobryk, N. (2015). Spreading and accumulation of heavy metals in soils of railway-side areas. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*, 23(2), 183–189. [In Ukrainian]
- Bondar, K.M., Kuraeva, I.V., Voitiuk, Yu.Yu., Tsyupa, I.V., Stakhiv, I.R., Matvienko, O.V., Kuz, Yu.V. (2016). Complex ecological-geochemical

assessment of territories with technogenic pollution. *Mineralogical Journal*, 38, 2, 88-95. [In Ukrainian]

Catalog of industrial enterprises of Chernivtsi as of 01.01.2019. (n.d.). Retrieved from <http://chernivtsy.eu/portal/katalog-tovarnoyi-produktsiyi-yakaviroblyayet-sya-promislovimi-pidpriyemstvami-mista-chernivtsi-stanom-na-01-10-2012-roku>. [In Ukrainian]

Chernivtsi City Development Strategic Plan for 2012-2016. (2012). Chernivtsi. Retrieved from <http://chernivtsy.eu/portal/>

Environment protection. Soil quality. (n.d.). Sampling and preparation methods for chemical, bacteriological, helminthological analysis. GOST 17.4.4.02:2019. [In Ukrainian]

Dearing, J.A. (1999). Environmental magnetic susceptibility using the Bartington MS2 System. Kenilworth: Chi Publ.

Fateev, A.I., Pashchenko, Ya.V. (2003). Background content of trace elements in soils of Ukraine. Kharkiv: Institute of Soil Science and Agrochemistry O.N. Sokolovsky. [In Ukrainian]

Fesnyuk, V.O., Pankevich S.G. (2007). Environmental impacts of environmental impact of sewage sludge on Lutsk city and ways to minimize it. *Nauk. praci UkrNDGMI*, 256, 286-292. [In Ukrainian]

Grabovsky, A.V. (2002). Migration and accumulation of heavy metals in agroecosystems adjacent to highways, in the conditions of Transcarpathia (soil-animal plants). *Dis. ... Cand. Biol. Sciences: 03.00.16*. Uzhgorod National University. Uzhgorod. [In Ukrainian]

Guthrie, G.D. (1995). Eat, breathe and wary: Mineralogy in environment health. *Reviews of Geophysics, Supplement*, 117-121.

Hanesch, M., Scholger, R. (2002). Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environ. Geol.* 42, 857-870.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Bondar, K., Matviishina, Zh. (2008). Magnetic structure of polluted soil profiles from Eastern Ukraine. *Acta Geophysica*, 49, 1012-1033.

Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K., Kądziałko-Hofmokl, M., Matviishina, Zh. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophysical Journal International*, 159 (1), 104-116.

Lu, S.G., Bai, S.Q. (2006). Study on correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China. *J. Applied Geoph.*, 60, 1-12.

Map of soils of Ukraine. (n.d.). Retrieved from <https://www.zerno-ua.com/journals/2014/yanvar-2014-god/kartoteka-agrariya-karta-g-runtiv-ukrayini>. [In Ukrainian]

Maltseva, I.A. (2016). Ecological and biological assessment of edaphopopes of urban ecosystems of Mariupol city. *Dis. ... Cand. Environm. Sciences: 03.00.16 "Ecology"*. Melitopol. [In Ukrainian]

Matasova, G.G., Kazanskiy, A.Yu., Bortnikova, S.B., Ayriyants, A.A. (2001). Petromagnitnyye issledovaniya okruzhayushey sredy, zagryaznennoy othodami gornorudnogo predpriyatiya (g. Salair, Zapadnaya Sibir). In: *Paleomagnetizm i magnetizm gomnyih porod: teoriya, praktika, eksperiment*. M.: GEOS, 56-58. [In Russian]

Muxworthy, A.R., Schmidbauer, E., Petersen, N. (2002). Magnetic properties and Mossbauer spectra of urban atmospheric particulate matter: a case study from Munich, Germany. *Geophys. J. Int.*, 150, 558-570. ISSN: 0956-540X

Regional report on the state of the environment of Chernivtsi region in 2017. (2018). Retrieved from https://menr.gov.ua/files/docs/Reg.report/2017/Reg_Dop_%20Чернівецька_2017.pdf. [In Ukrainian]

Rudenko, S.S., Kostyshyn, S.S., Morozova, T.V. (2003). Comparative analysis of contamination of agrolandshafts of Chernovtsy area by heavy metals and aluminium. *Ecology and Noosphereology*, 14, 3-4, 73-78. [In Ukrainian]

Shi, R., Cioppa, M.T., (2006). Magnetic survey of topsoils in Windsor-Essex Country, Canada. *J. Applied Geoph.*, 60, 201-212.

Soils of Ukraine. (n.d.). Retrieved from <http://geomap.land.kiev.ua/soil.html> [In Ukrainian]

Socio-economic analysis of Chernivtsi region to the draft Strategy of development of Chernivtsi region till 2027. (2019). Retrieved from <https://bukoda.gov.ua/uploads/editor/bukoda.gov.ua> [In Ukrainian]

Spasov, S., Zananiri, I., Koundopoulou, D., Atzemoglou, A., Polya, D. et al. (2004). Application of environmental techniques in detecting nanoparticle contamination. *Contributions to Geophysics & Geodesy*, 34, 141-143.

Stakhiv, I., Tsiupa, I., Bondar, K., Korol, A., (2017). Magnetic susceptibility as indicator of vehicle pollution of the topsoil in Odesa city. *Visnyk Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 78, 46-50. [In Ukrainian]

Strzyszc, Z., Magiera, T., Heller, F. (1996) The influence of industrial immissions on the magnetic susceptibility of soils in upper Silesia. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 40, 3, 276-286.

Sukhorada, A., Bondar, K., Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kądziałko-Hofmokl, M., Matviishina, Zh. (2004). Spatial distribution of ferrimagnetic pollution from iron-ore open-cast mines and metallurgical enterprises of Kryvyi Rig and Mariupol. *Contributions to Geophysics & Geodesy*, 34, 145-146.

The quality of the soil. Sampling. (2005). DSTU 4286: 2004. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine. [In Ukrainian]

Tomlinson, D.L., Wilson, J.G., Harris, C.R., Jeffney, D.W. (1980). Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgoland Marine Research*, 33 (1), 566-572.

Vodyanitskiy, Yu.N., Dobrovolskiy, V.V. (1998). Zhelezistyie mineraly i tyazhelyie metallyi v pochvah. M.: Pochvennyy institut im. V. V. Dokuchaeva RASHN. [In Russian]

Xie, S., Dearing, J. A., Bloemendal, J. (1997). The organic matter content of street dust in Liverpool, UK and its association with dust magnetic properties. *Atmospheric Environment*, 34, 269-275.

Yakovyshina, T.F. (2016). Index of anthropogenic loading on the soil of urboecosystems as a result of pollution by heavy metals. *Forum of miners - 2016: materials of intern. sci. pract. Conf., October 5 - 8, 2016. Dnipro*, 2, 224-229. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 04.12.19

K. Bondar¹, Cand. Sci. (Geol.), Senior Researcher
E-mail: ks_bondar@ukr.net;

A. Sachko², PhD (Chem.), Assoc. Prof

E-mail: an.sachko@chnu.edu.ua;

I. Tsiupa¹, engineer

E-mail: tsyupa@ukr.net;

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

²Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University,
2 Kotsiubinskoho Str., Chernovtsy, 58012, Ukraine

ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC POLLUTION OF SOILS IN CHERNIVTSI (UKRAINE) BY MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND HEAVY METAL CONTENT

The paper is devoted to spatial distribution of low-frequency magnetic susceptibility (χ) of surface sediments in Chernivtsi city as an informative indicator of geochemical contamination of the topsoil. The bulk content of heavy metals in urban soils and the correlations between the χ , frequency dependence of magnetic susceptibility (k_{fd}) and the content of Cd, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn were studied.

χ vary from $10 \cdot 10^{-8}$ to $1286 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{kg}$ with a median value of $66 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{kg}$. In 20 % of samples χ exceeds the median value three times or more, indicating that the soil is contaminated with iron dust and magnetic particulate matter derived from anthropogenic aerosols. Priority contaminants of city soils are metals such as Pb and Zn, the bulk content of which exceeds the trigger concentration in the vast majority of samples.

The χ revealed strong correlation with bulk content of Pb and Zn and the weaker one, but still statistically significant, with Cu and Cd. An additional criterion for the common anthropogenic origin of heavy metals and magnetic minerals in soils is the significant negative correlation coefficients between k_{fd} and content of Zn, Pb, and Cu.

So, it can be argued that the increase in Zn, Pb, and Cu content is accompanied by an increase in concentration of magnetic minerals in the multidomain state.

The maps were produced, showing spatial distribution of χ and Pollution Load Index (PLI), calculated by three metals (Zn, Pb, and Cu).

For 51 % of the samples, the PLI indicates no contamination, 35 % indicate moderate contamination, 14 % are strongly contaminated. These results prove that surface sediment over a large area of the city require measures to reduce their toxicity.

The correlation coefficient between χ and PLI makes 0.88, indicating χ as a quick indicator of geochemical soil contamination in the city of Chernivtsi.

Keywords: soil, magnetic susceptibility, heavy metals, Pollution Load Index, Chernivtsi.

К. Бондар¹, канд. геол. наук, ст. науч. сотруд.

E-mail: ks_bondar@ukr.net;

А. Сачко², канд. хим. наук, доц.

E-mail: an.sachko@chnu.edu.ua;

И. Цюпа¹, инж. 1 кат.

E-mail: tsyupa@ukr.net;

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка УНІ "Інститут геології",

ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;

²Черновецкий национальный университет имени Юрия Федьковича,

ул. Коцюбинского 2, г. Черновцы, 58012, Украина

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГОРОДА ЧЕРНОВЦЫ ПО МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ И СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

В работе исследовано пространственное распределение удельной магнитной восприимчивости (χ) поверхностных отложений города Черновцы как информативного индикатора геохимического загрязнения почвенного покрова. Изучались валовое содержание тяжелых металлов в почвах города и корреляционные связи между частотной зависимостью магнитной восприимчивости (χ_{fd}) и содержанием Cd, Mn, Cu, Ni, Pb, Zn.

Установлено, что значение χ изменяются от $10 \cdot 10^{-8}$ до $1286 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$ при медианном значении $66 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Для 20 % образцов медиана превышена в три и более раз, что свидетельствует о загрязнении почвы города железосодержащей пылью и твердыми магнитными частицами в составе техногенных аэрозолей. Приоритетными загрязнителями почвы города выступают металлы Pb и Zn, содержание которых превышает ПДК для подавляющего большинства образцов.

Корреляционные связи χ с Pb, Zn характеризуются как сильные, с Cu и Cd – как слабые, но все же статистически значимые. Дополнительным критерием общего техногенного происхождения тяжелых металлов и магнитных минералов в почвах есть значимые негативные коэффициенты корреляции между k_{fd} и содержанием Zn, Pb, Cu. То есть можно утверждать, что рост концентрации Zn, Pb и Cu сопровождается ростом количества магнитных минералов в многодоменном состоянии.

Построены картосхемы распределения χ и показателя накопления загрязнения PLI, рассчитанного по трем металлам (Zn, Pb и Cu).

Для 51 % образцов значение PLI свидетельствует об отсутствии загрязнения, для 35 % – об умеренном загрязнении, 14 % – очень сильном загрязнении почвы. Эти данные указывают на то, что поверхностные отложения большей части города нуждаются в проведении мероприятий по снижению их токсичности.

Коэффициент корреляции между χ и PLI составляет 0,88, что свидетельствует об эффективности использования удельной магнитной восприимчивости в качестве экспресс-индикатора геохимического загрязнения тяжелыми металлами почв города Черновцы.

Ключевые слова: почва, магнитная восприимчивость, тяжелые металлы, показатель накопления загрязнения, Черновцы.

UDC 550.837

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.11>

S. Bagriy, Cand. Sci. (Geol.),
E-mail: gbg2020@ukr.net;
E. Kuzmenko, Dr. Sci. (Geol.-Min.), PROF.,
E-mail: eduard.kuzmenko1@gmail.com;

U. Dzoba, Assist. Prof.,
E-mail: ulianadzoba@gmail.com;
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
Institute of Tourism and Geosciences,
15 Karpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

CORRELATION OF NATURAL PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD OF THE EARTH WITH STRESSES AND DEFORMATIONS, WHICH APPEARED IN EXHAUSTED SALT FIELDS IN THE PRECARPATHIANS FOR KARST CREATION FORECASTING

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

The problem of solving the ecological and geological issues which arise as the result of working off in natural resources (in particular the deposits of potassium salts) is actual at this time. Specificity is in easy solubility of salts and therefore the creation of artificial cavities and karstic phenomena. The article examines the ways to solve the problems of mapping the salt karst and forecasting creation of dips and subsidence of the earth's surface by the example of Kalush-Holyn potassium salt deposit which is located in Ukrainian Precarpathians. As the basis of the research, the complex geophysical methods were considered. It was proved that the method of natural pulsed electromagnetic field of the Earth (NPEMFE) can be selected as a reliable evaluation method of stress-strain state of rocks and prediction of karst processes and deformations which is associated with the presence of extracting chambers. The article describes the physical preconditions for applying the method, sets out the basic postulates of field intensity anomalies classification and proposes the methodology for depth evaluation. Using the real examples - the profile and planar research of potassium salt deposit - the success of the NPEMFE method is shown, along with its effectiveness to solve some ecological and geological problems, as well as feasibility of using the method in other areas.

Keywords: ecological and geological problem, geophysical methods of research, deposits of salt, natural pulsed electromagnetic field of the earth, karst, subsidence of the earth's surface.

Actuality of the question. One of the most significant manifestations of the impact of mining on the geological environment is the sinking of the earth's surface over mining workings. With the development of this process there is connected the decline in engineering-geological stability of rocks, the decomposition of rock masses occurring over underground workings, the redistribution of tensions around the produced space in the rock massif. Because of the accumulation of the earth's surface over mining, other dangerous processes such as flooding and waterlogging arise, which violate the natural conditions. Within the territory of Ukraine, the total area of cultivated land exceeds 5500 km², while the settlements and shifts over underground workings are recorded (*National report...*, 2013). In Ivano-Frankivsk region, within Kalush-Holyn deposit of potassium salts, the area of subsidence is 0.3 km², the depth ranges from 0.2 to 2.1 m. The destruction of residential and commercial buildings, as well as the formation of numerous subsidence trough (*Activation of hazardous exogenous geological processes...*, 2019).

Purpose and objectives of the research. The purpose of the study is to determine the state of stresses and deformations of rock masses at the observed sites of Kalush-Holyn potassium salt field by the method of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth (NPEMFE), by establishing interconnections between the results of geodetic and geophysical measurements and processing of predictive maps of the state of stresses and deformations of the rocks array. The final stage is the assessment of the risk of subsidence and deformation, as well as providing recommendations on the differentiation of the territory in terms of the possibility of building or the need to eliminate the activity of economic and residential facilities.

Analysis of literary data. Taking into account that the stress state of rocks can occur in different processes and appearances and depend simultaneously on a large number of factors, there is no single theory of NPEMFE for today. However, in some cases, A.A. Vorobyov and V.M. Salomatin presented the volume of experimental laboratory studies and measurement results of NPEMFE in various geological studies (Vorobyov, 1971, 1980; Salomatin et al., 1991).

New principles of data processing systems of NPEMFE in the studies of the stress-strain state of rocks in the shifting areas of Transcarpathia are described in the works of V.D. Cheban (*Cheban, 2002*). A.V. Bezsmertnyi proposed the use of NPEMFE in combination with other geophysical methods for studying landslides on the southern coast of Crimea (*Bezsmertnyi, 2004*). S.P. Kovalchuk describes the application of the method of NPEMFE in detail and describes the results of data processing on displacements and the search for catacombs in Odessa region (*Kovalchuk, 2003*).

Also, the problem of using the NPEMFE method in combination with other geophysical methods for forecasting exogenous geological processes is dealt with by E.D. Kuzmenko (*Kuzmenko et al., 2009*). In the works, the calculation of the probabilistic criterion for the predicted estimation of landslide sections is suggested and the possibility of using geophysical methods for determining the stability of landslide slopes is proved. Positive results of the NPEMFE method are used to outline underground galleries, mine workings, karst dips (*Khmara et al., 2008; Bagriy, 2016*). In the salt deposits in Ukraine, a complex of geophysical methods is used for studying salt karsts: gravimetry, probing by the formation of an electromagnetic field (ZS), by the method of the natural pulsed electromagnetic field of the Earth (NPEMFE) (*Kuzmenko et al., 2017, 2018; Shurovsky et al., 2012, 2013; Deshchytsia et al., 2016; Maksymchuk et al., 2019*).

The method of NPEMFE has also been applied successfully for the search for hydrocarbon pools (*Malyshkov et al., 2016*), the methodology for interpreting the NPEMFE anomalies associated with the appearance of earthquakes (*Hao et al., 2017*), and the search for geodynamically active faults to improve the safety of mining operations in ore deposits (*Belova et al., 2019*) and others.

Characteristics of the study area. From the geological point of view, salt deposits of the Carpathian region are located in the area of the spread of evaporate Neogene deposits in the Precarpathian and Transcarpathian marginal deflections. The location of salt deposits and salt manifestations are depicted in Fig. 1.

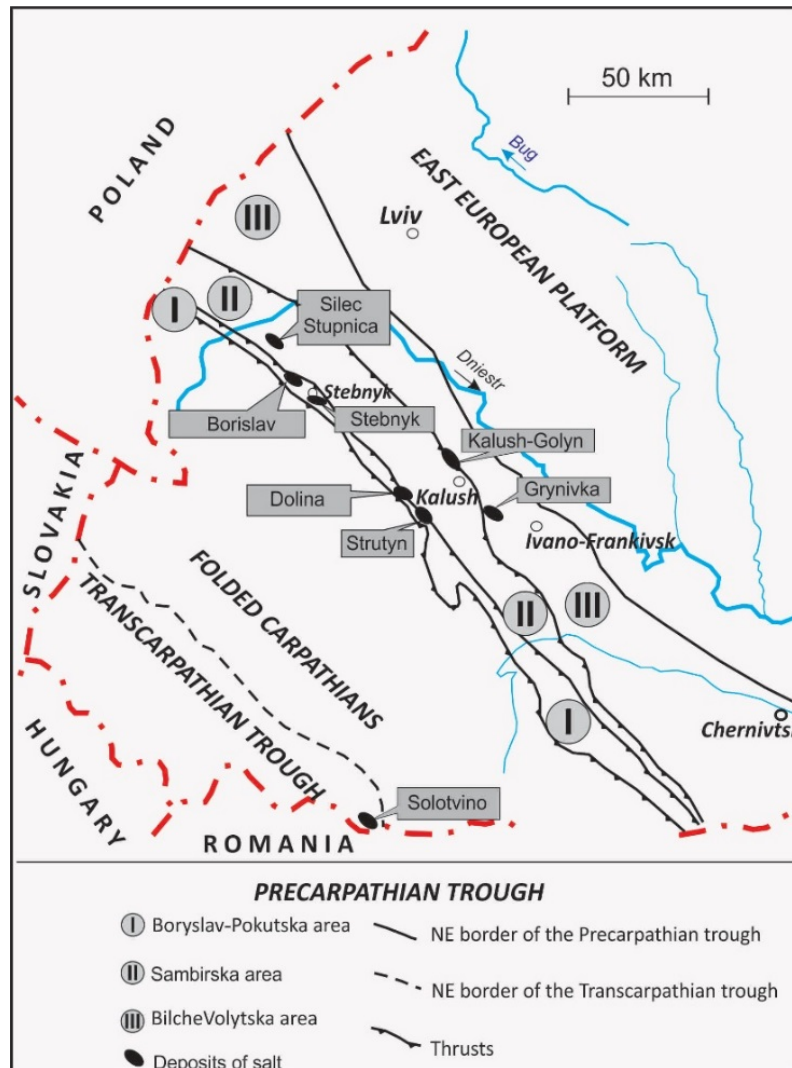


Fig. 1. Location of salt deposits and salt manifestations in the western part of Ukraine

Salt rocks have the sub-Carpathian stretch of at least 1000 km (Poland, Ukraine, Romania) with the width of several tens of kilometres.

In the Carpathian region, there are three geological formations, confined to Neogene deposits. The first formation is connected with the inner zone (Boryslav-Pokutsk), the second and third - with the outer zone (Sambir and Bilche-Volynska) deflection. In Ukraine, in the Carpathian region, there are two large deposits of potassium salt (each one of them is over 100 million tons): Stebnyk and Kalush-Holyn. The first refers to the inner zone, the second - to the external zone. A typical lithologic-stratigraphic section of Kalush-Holyn deposit is presented in Fig. 2.

In connection with changes in the sea level and depending on the frequency of alternation of Neogene deposits, one can assume that there are several salt deposits. The depth of the salt chambers produced in the lower layers is 300-400 m. The changes in deposits from subhorizontal to sub-vertical (the latter characteristic of Stebnyk deposit) are related to the post-neogene complex formation. Salt deposits are mostly surrounded by breccia. The presence of the upper part of the so-called "gypsum-clay hat" is due to weathering processes. The extraction of minerals on Kalush-Holyn field occurred in 1867-1995 in two ways: surface and underground. The surface method is represented by Dombrovskiy quarry, which after the end of operation had a volume of about 52 million m³. The produced underground chambers of Kalush mine (area 7.4 million m³), Novo-Holyn (area 12.1 million m³) and Holyn

(area 1.7 million m³) were only partially filled with solid material. Most of the voids are filled with unsweetened solutions of brine. This way of eliminating the voids does not guarantee the stability of the rock massif, in particular the rocks between and over the cameras. As a result, the surface of the earth can settle down with subsequent flooding and the formation of salt lakes. Geodetic and geophysical methods were used to determine the dynamics of precipitation and its prediction in time and space.

Tasks of the method of NPEMFE. Physical basis of the method. The method of NPEMFE is increasingly used to solve the following engineering, geological and environmental tasks:

- qualitative estimation of the total natural field of mechanical stress and tracking its dynamics;
- operational detection and prognosis of dangerous exogenous phenomena and geological processes;
- determination of the moment of activation of geodynamic processes, reflection and characteristics of zones of dissolution;
- status monitoring of residential buildings, utility rooms and infrastructure objects in order to detect possible deformations of foundations and walls of structures;
- assessing the state of strain and deformation of the dams and other hydrodynamic structures, defect detection and water filtration.

The method is based on the processes of generating minerals of the pulsed electromagnetic field during the change in the state of the rock mass.

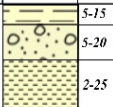
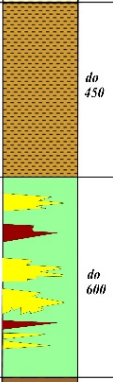
Era	System	Epoch	Stage	Formation	Lithology	Thickness, m	Short description of rocks
Cenozoic - KZ	Q	Not divided				5-15	Clay with a content of sand
						5-20	Gravel and pebbles horizon
						2-25	Gypsum-clay cap
	Q - N		Tortonian			do 450	Schist and fractured clays with interbeds of sandstones, siltstones
						do 600	Clay with a high content of salt and breccia, lenses and layers of potash and rock salt
						50 - 630	Schist and fractured clays with gypsum and anhydride, fine-grained sandstones and aleurolites

Fig. 2. Stratigraphic column of Kalush-Holyn potassium salt deposit

The structure of each solid is not perfect. This is especially true of the arrays and compounds occurring in nature - minerals and rocks, the composition of which consists mainly of dielectrics containing impurities, cracks, pores and other defects. The presence of an external source of energy causes the excitement of the internal structure of the body.

At the same time, the system proceeds from the state of equilibrium, and the excess of electromagnetic energy can be emitted. The transition from one state to another occurs through various changes, the most interesting of which are mechanical-electrical transformations. In the field of a variable mechanical stress, an excitation of a crystal lattice occurs. The mineral skeleton in the saturated and partially saturated rocks is the first to engage in mechanical and electrical transformations. In the clayey rocks, in addition to the cracks and deformations of the structures of the mountain skeleton, double electric layers are involved in the process of formation of pulsed electromagnetic fields. Intensive liquid filtration in capillaries, pores and other cavities is accompanied by polarization. Physical nature of phenomena forming pulsed fields is quite diverse. The founder of this method is considered to be the well-known physicist A. Vorobyov, who, introducing the concept of the "natural pulsed electromagnetic field of the Earth", understood a whole set of electrical discharges that are constantly present in all layers of our planet and in outer space (Vorobyov, 1980).

The intensity of geoelectric processes depends on many factors: the composition and properties of the rocks of different horizons, the degree of their activity, the thickness of the deformed masses, the nature of deformations. The difficult state of the stresses of a rock massif causes different possibilities of the course of mechanical and electrical phenomena. Because of this reason, these phenomena in the literature are considered separately. Unlike other geophysical methods, there is no single theory in the NPEMFE method.

For objects of natural origin, which have a complex structure and geological history, it is difficult to determine a

certain mechanism of mechanical and electrical transformations. Therefore, in the above-mentioned works, the correlation of the field strength for each parameter (affecting the field through initiation or intensification) is shown using qualitative and descriptive research methods. These studies are confirmed by a large empirical and experimental basis, which is consistent with the general physical and mathematical theorems.

The theoretical equations presented in A. Vorobyov's work give a general idea of the multifactorial nature of the electromagnetic radiation formation process. These formulas can in no way be the basis for solving the simple or reciprocal geophysical problem, since such templates do not exist for NPEMFEs. For this reason, it should be assumed that the NPEMFE method is a qualitative method, established on the basis of comparison of geological phenomena and corresponding field changes according to the principle "more or less", based on qualitative dependence of geological changes and electromagnetic field.

Among the fundamental works in the area of geological studies of the nature of the electromagnetic field in the earth's crust one should mention the works of B. Tarasov and his colleagues (Tarasov et al., 1983). As for the theoretical basis for the emergence of natural geoelectric potentials, the article by V. Ivanov (Ivanov et al., 1991) is the most informative and worth attention.

The basic idea is that stationary gradient geomechanical fields contain stationary flows of charged defects of internal structures represented in the form of ion deficiency (anions or cations). In the state of thermodynamic equilibrium, charged particles are compensated by charges with the opposite sign, indicating that the field does not exist. After the load is added, the charge equilibrium is disturbed, since there is a directed distribution of defects and their separation from the compensating charge cloud. This process causes the generation of electric current to which a certain electric potential corresponds.

The researches represented in the literature and the results obtained are theoretical substantiation and practical evidence that electromagnetic signals are generated in rocks of different mineralogical composition and with different properties (mechanical and electrical) at certain stages of microdeformation. In addition, the intensity of electromagnetic radiation at different types of loads increases with increasing content of dielectric minerals in rocks. The transition from one phase of stress / deformation to another is characterized by the extremums of the frequencies of electromagnetic pulses. The authors of this article pay particular attention to the fact that mechanical and electrical transformations of energy and pulsed radiation require a change in the state of mechanical stress over a period of time.

Lately, the researchers of NPEMFE have limited themselves to solving specific practical tasks concerning data processing and the specifics of interpretation in different geological conditions (*Dolgii et al., 2015; Dovbnich et al., 2012; Dodatko et al., 2013*).

Methodology and measurement methodology.

Practical implementation of the NPEMFE method is carried out in accordance with a specially developed method for the use of portable devices of indicator type.

The most commonly used in Ukraine is a relatively easy to use and inexpensive device for estimating the intensity of the flux (frequency of occurrence) of natural pulses of an electromagnetic field - a radio frequency indicator of a state of stress and deformation of rocks (RHINDS). The indicator was designed and manufactured by the Western Ukrainian Geophysical Expedition and the Scientific-Production Enterprise "Intellect" (Lviv). In addition, the devices "APOGEY" (Kyiv) and "ADONIS-32" (Simferopol), which were produced in different years in small quantities, are also used.

The method and way of performing work in the configuration of devices and work with them require the following sequence:

- division of devices according to the performed function. One device is set to the base (reference), and the other fixes the value of the field. The base unit is installed in a geologically homogeneous and immovable part of the measuring zone. Changes in field strength in this device are caused by various types of interference - space, atmospheric, induced by human. The meter operates in the usual geophysical profiling.

- device synchronization. Before starting measurements in the testing area, it is necessary to ensure simultaneous registration of the field. To do this, you need to connect the devices with a cable. Then set the same date and time (hour, minute, second) on each device.

- selection and setting of frequency range. The device can operate in the range of 2-50 kHz, that is, all pulses of the field in a given range will be written as the total value - the number of pulses per unit time. You can limit the registration of smaller intervals (but not less than 5 kHz) - adapting to specific tasks. Increasing the frequency leads to a decrease in the depth of the range, that is, the choice of different frequency ranges allows you to control the range of depth.

- setting the time and range of measurement. Measurement interval is the period during which a device performs a measurement. This parameter depends on the time of measurement on the profile and the distance between the profiles, since during this time the device needs to be moved to the next measurement point. The measurement cycle is constant for both devices and is determined by an empirical method with a certain margin. Measurements on each device are carried out in each cycle.

- setting the pulse accumulation mode. In order to minimize the role of random signals, the device has a

function of accumulation of 1 to 15 full measurements over a period of time. For example, you can set the mode of 15 measurements for 15 seconds (1 measurement per second), you can also set the mode of 10 measurements in 20 seconds (1 measurement in 2 seconds), etc. The duration of the measurement - 1, 2, 10, 60 seconds should be taken into account. In the final result, we determine the total number of pulses measured over a period of time, that is, the number of pulses per second.

- orientation of antennas. According to the technical documentation, field registration is carried out simultaneously for three antennas: two horizontal - X and Y and vertical Z. The antennas X and Y are oriented along the directions south-north and west-east. When displaying specific objects, one of the antennas should be directed along the other, and the other - through the length of the geological elements. For example, in the case of a bias, one antenna should be directed along the slope, and the other one is across. In each of the examples above, the antennas are oriented identically for each time.

- the intensity of the radiation of the electromagnetic field is denoted by I_x , I_y , I_z . Additionally calculate the total intensity (vector of the full field), taking into account the interaction of each of the components according to the formula $T = \sqrt{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}$. For each antenna is measured the number of impulses per unit time (imp/s).

- data recording. Data recording from each antenna of the device is carried out through the corresponding modules installed in the device. Saved information can be read on the computer with the added software.

Requirements for monitoring network NPEMFE are similar to general requirements for geophysical profiling (electric, magnetometric, gravimetric) in the profile or planar versions.

The end results of the work are the graphs and maps of the intensity of electromagnetic radiation for each antenna. Anomalies from horizontal antennas usually reflect anisotropic properties on a plane, and the vertical antenna records an integrated signal that is transmitted from all sides.

At the stage of preparing for the construction of charts and maps from the obtained values of field strength, it is necessary to deduct the values of variations that the stationary device fixes. As a result, we get a signal without regional interference (characteristic of this area). During the interpretation, maps of anisotropy coefficients are also calculated, which are calculated as the ratio of signals from the horizontal components (I_x/I_y or I_y/I_x) for each

observation point. When taking into account anisotropy coefficients, the level of obstacles associated with geological inhomogeneities is significantly reduced.

The resulting graphs and maps of NPEMFE in the future can be considered as an independent source of information or used as part of a complex study (*Kuzmenko et al., 2009*).

Interpretation of NPEMFE. Theoretical models. Prediction of breed deformations based on NPEMFE data can be based on the following principles:

- estimation of the state of stresses of the mountain mass and prediction of conditions for its possible transition to a critical state;

- determination of permanent deformations in rocks and prediction of their transition to the phase of destruction;

- monitoring deformation processes to protect existing objects from destructive effects.

There is no doubt that the methods based on the study of the laws of changes in the properties of rocks are most

useful in predicting, since they provide information on the phenomena that precede the visible deformation of rocks. The application of the NPEMFE method contributes to the effective solution of these problems, as evidenced by the multifactorial nature of the processes accompanied by pulsed electromagnetic radiation. This is confirmed by a formula that makes it possible to understand the physics of the process, but it can not be used for modeling (Kuzmenko *et al.*, 2018).

This is due to the fact that the values of the parameters in these formulas are unknown and, in theory, can vary in considerable limits. Therefore, from a qualitative point of view, it is necessary to consider possible inaccuracies and to classify them under certain conditions.

The distribution of mechanical stresses associated with mining is given in (Fig. 3). The processes forming the pressure of the mountain mass include:

- deformation;
- movement and destruction of elements of the surface of the earth;
- the interaction of elements of the array with buildings and structures.
- The main factor causing pressure in the mountain mass is gravity. Other factors having different probabilities of occurrence, duration and strength include:
 - tectonic (geodynamic) processes;
 - production activity related to the extraction of minerals;
 - the presence of underground and terrestrial facilities.

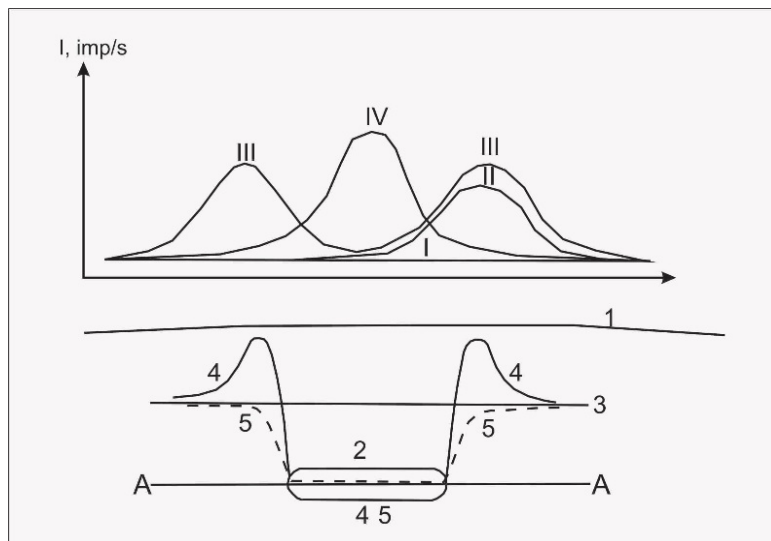


Fig. 3. The changing of mechanical tension distribution due to mining development:

1 – terrestrial surface; 2 – underground mine working; 3 – vertical and horizontal tension at points of straight AA before the development; 4 and 5 – respectively vertical and horizontal tension at points of straight AA after the development.
I – IV – NPEMFE curves

The intensity curves of NPEMFE in pulses per second for various possible situations that occur in practice during surveillance are shown in Fig. 3. In the presence of rocks without any changes in static pressure in time, we obtain curve I. In the case of a rock mass change due to the deformation of any cell chambers (for example, the right to the figure) we obtain the curve II, and all groups are deformed - curve III. In the presence of additional intensifications over the sloping camera, we obtain the curve IV. Obviously, combinations of these situations can be ruled out. In addition, additional signals from NPEMFE are possible with a partial understanding of the solar breccias and, accordingly, deformation of the rock massif.

In the initial stages of the development of deformation, dislocation and relaxation of arrays, changing the mountains with the help of electrical transformations will be recorded only in the NPEMFE field. This means that only this method can be used for forecasting. At the following stages, the subsidence of the earth's part is observed in the form of isometric multitudes, which to some extent undergo corrections from the anomaly of NPEMFE.

Results of research of NPEMFE. Geophysical surveys were carried out at all mine fields of Kalush-Holyn field. Many geophysical data were collected for this area. The majority of the sites used the method of NPEMFE, as well as geodetic measurements of the surface of the Earth, which had a monitoring character, were performed.

Below is an analysis of NPEMFE materials for the following elements: profiling, surface surveys, recurrent regime observations. The local elements for the selected

sections of the profiles are presented in such a way as to show the anomalies of the intensity of the electromagnetic field over the mining structures or complexes of structures (Fig. 4). To demonstrate the intensity, the total intensity vector I, which contains information from all antennas, is taken.

Anomalies on Fig. 4, a-d fully correspond to model curves I-IV (Fig. 3). In the presence of a series of cameras, they should be considered as one large cavity and the anomaly will reflect the total effect. The curves in Figure 4, e-f are confirmation of this, where abnormal effects in the central part and extreme values over the cameras are observed. It should be borne in mind that these significant violations of the intensity of radiation correspond to the development of sections of dissolution in the upper part of the section at the active stage of precipitation.

We take 4 as an example to create a model for qualitative interpretation of NPEMFE data and, accordingly, the classification of abnormal violations. It is advisable to consider the compatibility of types of anomalies of NPEMFE with the stages of subsidence. Next Tab. 1 shows the sequence of stages of activity of the earth surface sediments, which is determined on Fig. the basis of comparison of geophysical and geodetic measurements.

The initial stage is characterized by small precipitation (up to 1 m) at a rate of 0-20 mm/year and the absence or presence of individual karst craters. At the stage of active sedimentation, the maximum speed increases to hundreds of millimeters per year, and the maximum precipitation reaches several meters per year. In the central part of the sediment, lakes are formed, and in the surrounding areas

there are numerous karst craters and dips. At the final stage, the rate of precipitation decreases significantly. Each of these stages is accompanied by the development of a certain type of anomalies of NPEMFE.

For the proposed methodology of research, it is necessary to introduce another phase, which precedes the initial stage. This stage was introduced to determine the implicit (or hidden) processes of changing the stresses and deformations of rocks.

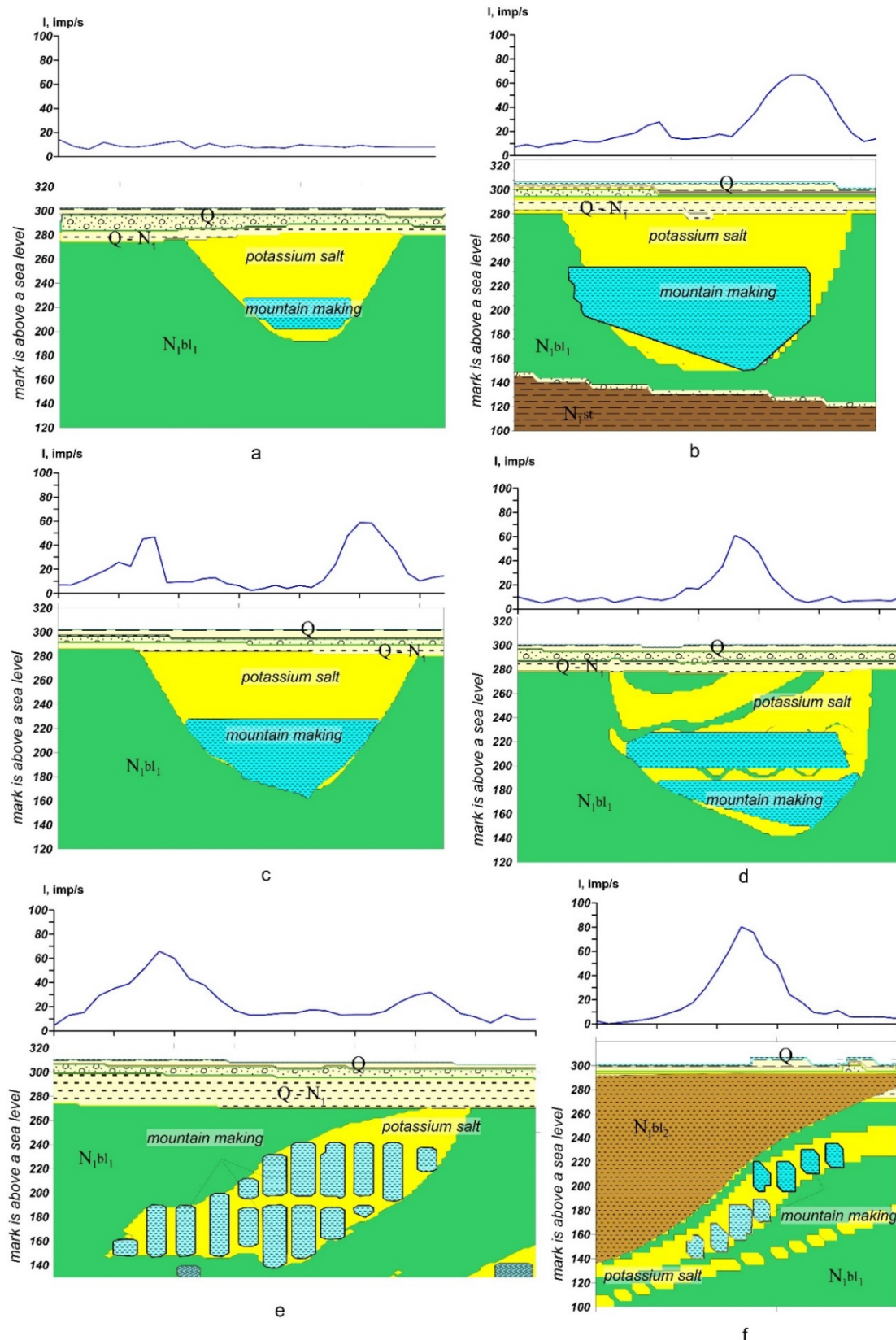


Fig. 4. Fragments of geological models and corresponding curves NPEMFE:

a, b, c, d – one cavity: a – there is no change in static pressure over time, b – deformation of the right wall cavity, c – deformation of walls, d – tensions over the ceiling cavity; e, f – complex cavities: e – anomalies in marginal areas, f – central anomaly

Table 1

Conformity of NPEMFE anomalies to the stages of subsidence in Kalush-Holyn deposit

Deposit	Deposit field, area		Maximum value of surface subsidence, [m]	Maximum speed of subsidence, [mm/year]	Stage of subsidence	Characteristics of NPEMFE anomalies					
						On map			On resistance profile		
						Intensity	Size	Shape	Intensity	Size	Shape
«Kalush»	Hotin sylvinite field		2.8	211 mm/year	attenuation	major	major	circular, isometric	data available		
«Nova Holyn»	Eastern Holyn	Western part	0.385	17 mm/year	initial	medium	medium	circular, isometric	all	small	leneral
		Eastern part			active	major	major			medium	
	Kalush-Sivka	Northern part	0	-	null	small	small	all	small	small	leneral
		Southern part	0.255	11 mm/year	initial	medium	small	isometric	medium	medium	
« Holyn »	Holyn		1.37	24 mm/year	attenuation	data available			major	medium, major	leneral

The difference between this stage and the other is that the fact that the deformation is not fixed with the help of geodetic measurements, that is, the deposition has not occurred yet, but will necessarily occur in the future on the plane or along the line of violation of the intensity of the field. In this sense, the results of the NPEMFE method can be considered as predictive of increasing stresses and deformations. The said anomalous phase of NPEMFE is called pre-primary.

Planar (superficial) studies in the mine fields Khotyn, Sivka-Kaluska, Holyn testify to the effectiveness of using the method to determine the stress state and deformations. Violations of the intensity of the electromagnetic field may precede precipitation or occur simultaneously, in parallel. The typical confirmation of this is the results of field geodetic observations and the results of NPEMFE research on the Novo-Holyn mine field (Fig. 5).

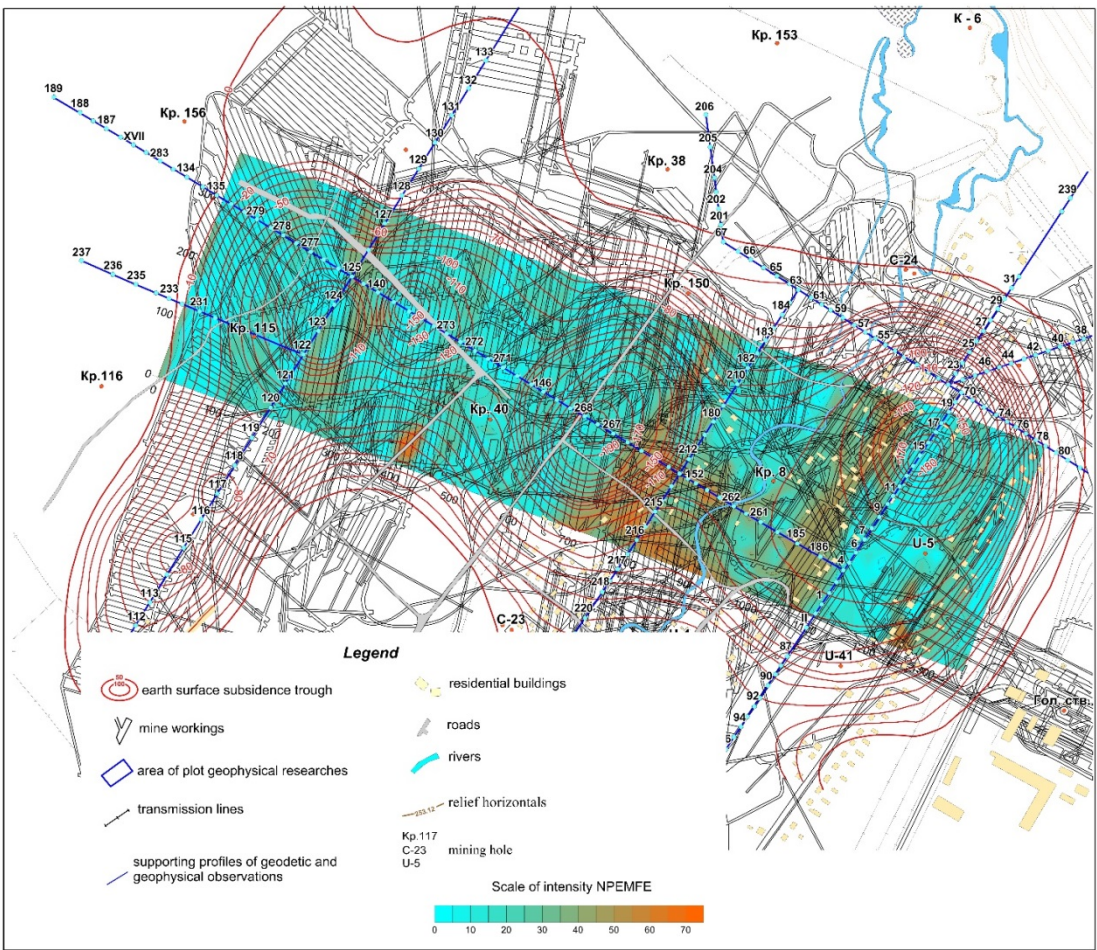


Fig. 5. Results of profile geodetic and flat researches NPEMFE. The deposit "Nova Holyn"

The effectiveness and reliability of the NPEMFE method is further confirmed by the results of monitoring observations (Fig. 6). In 2005, three zones with abnormal values of about 25–50 imp/s were detected over the cameras, which were responsible for the presence of dynamic deformations near

the walls and over the roof of the chambers. At the same time, the subsidence of the earth's surface was not fixed, that is, there was a "pre-initial" stage, indicating the beginning of a violation of the state of rocks, which has not been observed on the Earth's surface yet. In 2012, the

deformation area was formed that was accompanied by precipitation at an initial stage. In 2013, the intensity of the anomalies of the electromagnetic field significantly increased to 65 imp/s, while maintaining the area of distribution of the previous year, and the initial stage of subsidence moved into an active stage. The presence of certain field anomalies in accordance with the data of gravimetry is due to the development of areas of dissolution associated with the processes of deformation, and, probably, with the washing of salt from rocks in the infiltration of surface water in the chamber. It should also be noted that the intensity of the field on the left side of the profile is much

higher compared to the initial measurements in 2005. This indicates the development of deformation processes due to the presence of the lower row of chambers.

As the result of the analysis of the data presented in Figures 5-6, the problem of assessing the environmental risk in the area can be solved. As the result, it is possible to answer the question of a balanced and diversified approach to preventive actions, in particular the need to resettle residents from territories threatened by the formation of karst craters and the development of processes of subsidence of the earth's surface.

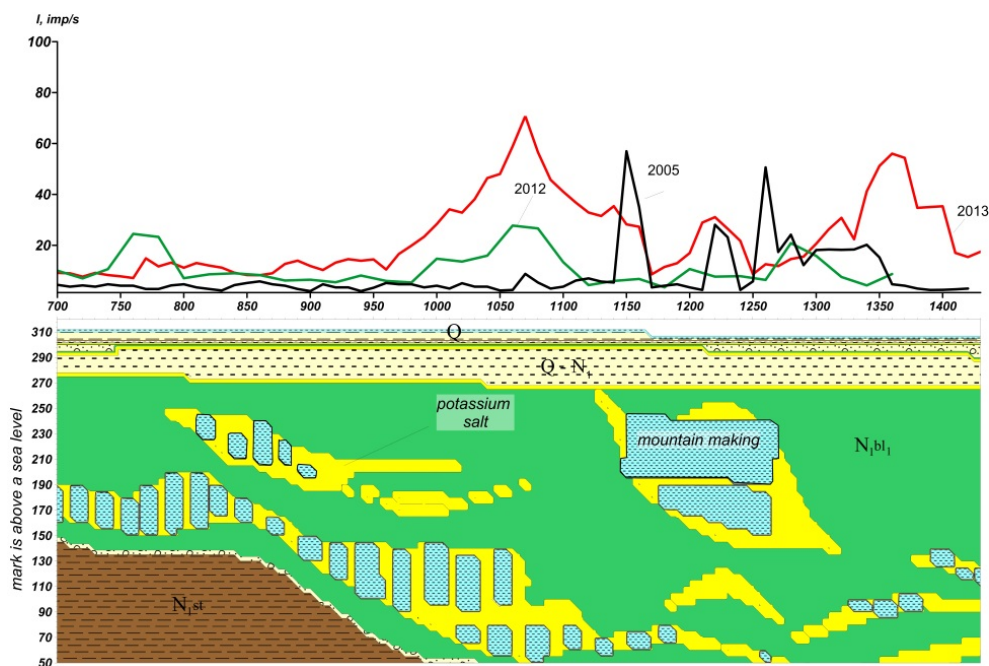


Fig. 6. Monitoring by NPEMFE observation method

Conclusions. Summing up, one can distinguish the following conclusions.

1. The problem of predicting the development of salt karsts and deformation processes on waste deposits of potassium and rock salt is relevant and well-known. In particular, in the Carpathian region of Ukraine, this problem appeared on the territories of the Sotolvyno rock salt (Transcarpathia), Stebnyk and Kalush deposits of potassium salt (Precarpathians).

2. One of the priority directions of research of salt karsts and prediction of surface sedimentation and karst phenomena is the use of geodetic measurements and complex geophysical researches: vertical electrical probing, sounding of the formation of an electromagnetic field, tomography of electro-aerial, georadar measurements, natural pulsed electromagnetic field of the earth, gravimetry. However, the named complex is burdensome and requires considerable material costs.

3. The results of the study showed that in the first stage of this geophysical complex it is expedient to use the NPEMFE method, which is based on the registration of the intensity of the pulsed electromagnetic field arising as the result of the mechano-electric transformations in the dynamic changes of the stressed state of rocks, leading to their deformation.

4. The method of NPEMFE should be considered predictable, since it provides information on the development of the deposition of the earth's surface and failure phenomena even before they are fixed by geodetic measurements. Similarly, information can be obtained by other methods of electrometry by changes in electric

resistance and gravimetry by changing the density of rocks. However, the NPEMFE method should be considered as the mobility of execution and informativeness by the express method. Other methods, especially gravimetric and electrometric, should be considered as methods of detailing.

5. The advantages of the NPEMFE method, in addition to the forecast of the geodynamic process development, are the possibility of differentiation of the zones of subsidence of the Earth's surface, as well as in identifying the stages of deformation or subsidence - pre-primary, initial, active, final.

6. The article describes the classification characteristics of the NPEMFE anomalies for the first time in accordance with the degree of ecological-geological risk, coordinated with the causes and characteristics of deformation processes, formed the criteria for qualitative interpretation for examples of specific geological situations, and also demonstrated the effectiveness of the method for Kalush-Holyn potassium salt deposit in Ukrainian Precarpathians.

7. It is confirmed that the NPEMFE method is promising for the use on other territories to assess the ecological risk associated with the development of exogenous geological processes (karst, landslide) in conditions of violation of the primary state of rocks due to dynamic changes.

Список використаних джерел

- Активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів за даними моніторингу ЕГП. (2019). Державна служба геології та надр України. Київ. Випуск XVI. Отримано з http://www.geoinf.kiev.ua/SZHORICHNYK_2019.pdf
- Багрий, С.М. (2016). Геофізичний моніторинг геологічного середовища в межах родовищ калійної солі (на прикладі Калуш-Голинського родовища). Дис. ... канд. геол. наук: 04.00.22. Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ.

Бессмертный, А.Ф. (2004). Комплексные геофизические исследования оползней и построение прогнозных моделей их активности (на примере Южного берега Крыма). Дис. ... канд. геол. наук: 01.04.12. Симферополь.

Воробьев, А.А. (1971). Физические условия залегания вещества в земных недрах. Ч. 1. Томск: Изд-во Томского политехн. ин-та.

Воробьев, А.А. (1980). Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. Томск: Изд-во Томского ун-та.

Дешица, С., Підвірний, О., Романюк, О., Садовий, Ю., Коляденко, В., Савків, Л., Мишишин, Ю. (2016). Оцінка стану екологічно проблемних об'єктів Калуського гірничопромислового району електромагнітними методами та їх моніторинг. *Nauka innov.*, 12(5), 47–59.

Довбніч, М.М., Стовас, Г.М., Канін, В.О. (2012). Спостереження ПІЕМПЗ і вертикального градієнту магнітного поля Землі на полі шахти ім. О.Ф. Засядька. *Наукові праці Укр НДМІ НАН України*, 10, 342–348.

Долгий, М.Е., Катаев, С.Г. (2015). Исследование естественного импульсного электромагнитного поля Земли. *Вестник Томск. гос. ун-та. Матем. и мех.*, 2(34), 61–70. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988621/34/6>

Иванов, В., Тарасов, Б., Кузьменко, Е., Гордийчук, Н. (1991). О геомеханической природе потенциалов электрического поля в земной коре. *Изв. ВУЗов. Геология и разведка*, 3, 101–104.

Ковальчук, С.П. (2003). Поставь свой дом правильно (практика геофизического метода ЕІЭМПЗ). Одесса: Черноморье.

Кузьменко, Е.Д., Багрий, С.М., Чепурный, І.В., Штогрин, М.В. (2017). Оцінка небезпеки приповерхневих деформацій гірських порід у межах Стебницького калійного родовища методом ПІЕМПЗ. *Геодинаміка*, 1(22), 98–113.

Кузьменко, Е.Д., Бессмертный, А.Ф., Вдовина, О.П., Крив'юк, І.В., Чебан, В.Д., Штогрин, Л.В. (2009). Дослідження зсувних процесів геофізичними методами. За ред. Е.Д. Кузьменка. Івано-Франківськ: ФНТУНГ.

Максимчук, В., Сапузак, О., Дешица, С., Ладанівський, Б., Романюк, О., Коляденко, В. (2019). Дослідження карстопровальних процесів на території Стебницького родовища калійних солей методами електророзвідки. *Геофорум-2019. Збірник тез доповідей 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції, Львів*, 37–38.

Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні у 2012 р. (2013). Державне підприємство "Агентство "Чорнобильінформ".

Саломатин, В.Н., Мастов, Ш.Р., Защинский, Л.А. (1991). Методические рекомендации по изучению напряженного состояния пород методом регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕІЭМПЗ). Симферополь: КИПКС, КОСННО.

Тарасов, Б., Дырдин, В., Иванов, В.В. (1983). Геоэлектрический контроль состояния массивов. Москва: Недра.

Хмара, І. Є., Кузьменко, Е. Д., Багрий, С.М. та ін. (2008). Проведення моніторингових спостережень над шахтними полями Калусь-Голинського родовища калійних солей. *Звіт про науково-дослідну роботу. № ДР 0108U007562, Інв. №0309U00296. Калусь: ДП "НДІ Галурії"*.

Чебан, В.Д. (2002). Комплекс геофізичних методів прогнозування зсувів на прикладі Закарпаття. Дис. ... канд. геол. наук: 04.00.22. Івано-Франківськ: ФНТУНГ.

Шуровський, О.Д., Анікеєв, С.Г., Шамотко, В.І., Дешица, С.А. (2013). Геофизический мониторинг геологической среды для решения экологических проблем в пределах агломерации г. Калуща. *Горный журнал*, 12, 99–104.

Шуровський, О.Д., Анікеєв, С.Г., Шамотко, В.І., Дешица, С.А., Ніколаєнко, О.А., Поплюйко, А.Г. (2012). Геофізичний моніторинг екологічно небезпечних геологічних процесів в агломерації м. Калуща. *Мінеральні ресурси України*, 2, 31–38.

Belova, M., Iakovleva, E., Popov, A. (2019). Mining and environmental monitoring at open-pit mineral deposits. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 172–178. doi:10.12911/22998993/105438

Dodatk, A.D., Zmiyevskaya, K.O., Kozar, N.A. (2013). Detalization of tectonic features of the sergeyevskoye deposit by means of the method of natural impulse electromagnetic field of the earth. *Naukovyi Visnyk Natsionalno Hirnychoho Universytetu*, 1, 5–10.

Hao, G., Bai, Y., Wu, M., Wang, W., Liu, H. (2018). Time-frequency analysis of the earth's natural pulse electromagnetic field before earthquake based on BSWT-DDTFA method. *Acta Geophysica Sinica*, 61(10), 4063–4074. doi:10.6038/cjg2018L0431

Kuzmenko, E.D., Bagriy, S.M., Dzoba, U.O. (2018). The depth range of the Earth's natural pulse electromagnetic field (or ENPEMF). *Journal of Geology Geography And Geoecology*, 27, 3, 466–477. DOI: 10.15421/111870.

Malyskov, Y., Malyskov, S. (2016). The algorithm for calculating the earth's core runs on the parameters of natural pulsed electromagnetic field of the earth. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 48(1). doi:10.1088/1755-1315/48/1/012028

References

Activation of hazardous exogenous geological processes according to monitoring EGP. (2019). State Service of Geology and Subsoil of Ukraine. Kyiv, XVI. Retrieved from http://www.geoinf.kiev.ua/SZHORICHNYK_2019.pdf [in Ukrainian]

Bagriy, S.M. (2016). Heofizychnyi monitorynh heolohichnoho seredovyscha v mezhakh rodovysch kaliinoi soli (na prykladi Kalush-

Holynskoho rodovyssha). *Dis. ... Cand. Geol. Sciences*: 04.00.22. Ivano-Frankiv. nats. tekhn. un-t nafty i hazu, Ivano-Frankivsk. [in Ukrainian]

Belova, M., Iakovleva, E., Popov, A. (2019). Mining and environmental monitoring at open-pit mineral deposits. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 172–178. doi:10.12911/22998993/105438

Bessmertnyi, A.F. (2004). Kompleksnyye geofizicheskiye issledovaniya opolzney i postroyeniye prognoznnykh modeley ikh aktivnosti (na primere Yuzhnogo berega Kryma). *Dis. ... Cand. Geol. Sciences*. Simferopol. [in Russian]

Cheban, V.D. (2002). Kompleks heofizychnykh metodiv prohnouzuвання zsuviv na prykladi Zakarpattia. *Dis. ... cand. geol. sciences: 04.00.22*. Ivano-Frankivsk. [in Ukrainian]

Deshchytia, S., Pidvirnyi, O., Romaniuk, O., Sadoviy, Yu., Koliadenko, V., Savkiv, L., Myshchysyn, Yu. (2016). Otsinka stanu ekolohichno problemnykh ob'ektiv Kaluskoho hirnychopromyslovoho raiunu elektromagnitnymi metodamy ta yikh monitorynh. *Nauka innov.*, 12(5), 47–59. [in Ukrainian]

Dodatk, A.D., Zmiyevskaya, K.O., Kozar, N.A. (2013). Detalization of tectonic features of the sergeyevskoye deposit by means of the method of natural impulse electromagnetic field of the earth. *Naukovyi Visnyk Natsionalno Hirnychoho Universytetu*, 1, 5–10.

Dolgii, M.E., Kataev, S.G. (2015). Issledovanie estestvennogo impulsnogo elektromagnitnogo polya Zemli. *Vestn. Tomsk. gos. un-ta. Matem. i mekh.*, 2(34), 61–70. DOI: <https://doi.org/10.17223/19988621/34/6> [in Russian].

Dovbnich, M.M., Stovas, H.M., Kanin, V.O. (2012). Sposterezhenia PIEMPZ i vertykalnoho hradientu mahnitnoho polia Zemli na poli shakty im. O.F. Zasiadka. *Naukovi pratsi Ukr NDMI NAN Ukrainy*, 10, 342–348. [in Ukrainian]

Hao, G., Bai, Y., Wu, M., Wang, W., Liu, H. (2018). Time-frequency analysis of the earth's natural pulse electromagnetic field before earthquake based on BSWT-DDTFA method. *Acta Geophysica Sinica*, 61(10), 4063–4074. doi:10.6038/cjg2018L0431

Ivanov, V.V., Tarasov, B.G., Kuzmenko, E.D., Gordiyuk, N.V. (1991). O geomekhanicheskoy prirode potentsialov elektricheskogo polya v zemnoy kore. *Izv. VUZov. Geologiya i razvedka*, 3, 101–104. [in Russian]

Khmara, I.Ye., Kuzmenko, E.D., Bagriy, S.M. et al. (2008). Provedennia monitorynhovykh sposterezhen nad shakhtnymy poliamy Kalush-Holynskoho rodovyssha kaliinykh solei. *Science report*. № DR 0108U007562, Inv. №0309U00296. Kalush: DP "NDI Halurii". [in Ukrainian]

Kovalchuk, S.P. (2003). Postav svoy dom pravilno (Praktika geofizicheskogo metoda EIEMPZ). Odessa: Chernomorye. [in Russian]

Kuzmenko, E.D., Bagriy, S.M., Chepurnyi, I.V., Shtohryn, M.V. (2017). Otsinka nebezpeky prypoverkhnivykh deformatsii hirsykh porid u mezhakh Stebnytskoho kaliinoho rodovyssha metodom PIEMPZ. *Heodynamika*, 1(22), 98–113. [in Ukrainian]

Kuzmenko, E.D., Bagriy, S.M., Dzoba, U.O. (2018). The depth range of the Earth's natural pulse electromagnetic field (or ENPEMF). *Journal of Geology Geography And Geoecology*, 27, 3, 466–477. DOI: 10.15421/111870.

Kuzmenko, E.D., Bezsmertnyi, A.F., Vdovyna, O.P., Kryviuk, I.V., Cheban, V.D., Shtohryn, L.V. (2009). Doslidzhennia zsuvnnykh protsesiv heofizychnykh metodamy. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG. [in Ukrainian]

Maksymchuk, V., Sapuzhak, O., Deshchytia, S., Ladanivskyi, B., Romaniuk, O., Koliadenko, V. (2019). Doslidzhennia karstoprovalnykh protsesiv na terytorii Stebnytskoho rodovyssha kaliinykh solei metodamy elektrorozvidky. *Heoforum-2019. Zbirnyk tez dopovidei 24-yi Mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferentsii, Lviv*, 37–38. [in Ukrainian]

Malyskov, Y.P., Malyskov, S.Y. (2016). The algorithm for calculating the earth's core runs on the parameters of natural pulsed electromagnetic field of the earth. *Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 48(1). doi:10.1088/1755-1315/48/1/012028

National report on the state of technogenic and natural safety in Ukraine in 2012. (2013). State Service "Ahentstvo "Chornobylinform". [in Ukrainian]

Salomatin, V.N., Mastov, Sh.R., Zashchinsky, L.A. (1991). Metodicheskiye rekomendatsii po izuchenniyu napryazhenogo sostoyaniya porod metodom registratsii estestvennogo impulsnogo elektromagnitnogo polya Zemli (EIEMPZ). Simferopol. [in Russian]

Shurovsky, O.D., Anikeev, S.G., Shamotko, V.I., Deshchytia, S.A. (2013). Geofizichesky monitoring geologicheskoy sredy dlya resheniya ekologicheskikh problem v predelakh aglomeratsii g. Kalusha. *Gornyiy zhurnal*, 12, 99–104. [in Russian]

Shurovsky, O.D., Anikeev, S.H., Shamotko, V.I., Deshchytia, S.A., Nikolaienko, O.A., Popliuiko, A.H. (2012). Heofizychnyi monitorynh ekonebezpechnykh heolohichnykh protsesiv v ahlomeratsii m. Kalusha. *Mineralni resursy Ukrainy*, 2, 31–38.

Tarasov, B., Dyrudin, V., Ivanov, V. (1983). Geoelektricheskiy kontrol sostoyaniya massivov. Moskva: Nedra. [in Russian]

Vorobyov, A.A. (1971). Fizicheskie usloviya zaleganiya veschestva v zemnykh nedrah. Tomsk: Izd. Tomskogo universiteta. [in Russian]

Vorobyov, A.A. (1980). Ravnovesiye i preobrazovaniye energii v nedrah. Tomsk: Izd. Tomskogo universiteta. [in Russian]

Надійшла до редакції 13.09.19

С. Багрій, канд. геол. наук
E-mail: gbg2020@ukr.net;
Е. Кузьменко, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: kuzmenko.eduard@gmail.com;
У. Дзьоба, асист.
E-mail: ulianadzoba@gmail.com;
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
Інститут природничих наук і туризму,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

ЗВ'ЯЗОК ПРИРОДНОГО ІМПУЛЬСНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ З НАПРУЖЕННЯМИ ТА ДЕФОРМАЦІЯМИ ГІРСЬКИХ ПОРІД НА ВІДПРАЦЬОВАНИХ РОДОВИЩАХ СОЛІ В ПЕРЕДКАРПАТТІ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ КАРСТУ

У даний час актуальним є питання вирішення еколого-геологічних проблем, які виникають у результаті відпрацювання природних ресурсів, зокрема родовищ калійних солей. Специфічність полягає у легкій розчинності солей і, отже, у створенні штучних порожнин і карстових явищ. Розглянуто шляхи вирішення проблем картування соляного карсту та прогнозування провалів і осідань земної поверхні на прикладі Калуш-Голінського родовища калійної солі, що знаходиться в Українському Прикарпатті. Як основи дослідницького комплексу були розглянуті геофізичні методи. Доведено, що для достовірної оцінки напружено-деформованого стану гірських порід і відповідно для прогнозування карстових процесів і деформацій, пов'язаних із наявністю видобувних камер і розвитком карсту, можна успішно застосовувати метод природного імпульсного електромагнітного поля Землі (ПІЕМПЗ). Розглянуто фізичні передумови застосування методу, викладено основні постулати класифікації аномалій напруженості поля, розроблено підхід для оцінки глибини. У реальних прикладах показано результати профільних та площинних досліджень у межах калійного родовища солі, які свідчать про ефективність методу ПІЕМПЗ для вирішення еколого-геологічних задач.

Ключові слова: еколого-геологічна проблема, геофізичні методи дослідження, родовища солі, природне імпульсне електромагнітне поле Землі, карст, осідання земної поверхні.

С. Багрій, канд. геол. наук
E-mail: gbg2020@ukr.net;
Э. Кузьменко, д-р геол.-минералог. наук, проф.,
E-mail: kuzmenko.eduard@gmail.com;
У. Дзьоба, ассист.
E-mail: ulianadzoba@gmail.com;
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа,
Институт природоведческих наук и туризма,
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019, Украина

СВЯЗЬ ЕСТЕСТВЕННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ОТРАБОТАННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ СОЛИ В ПРИКАРПАТЬЕ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ КАРСТА

В настоящее время актуальным является решение экологических и геологических проблем, возникающих в результате отработки природных ресурсов, в частности месторождений калийных солей. Специфика заключается в легкой растворимости солей и, следовательно, в создании искусственных полостей и карстовых явлений. Рассматриваются способы решения задач картирования солевого карста и прогнозирования образования провалов и оседаний земной поверхности на примере Калуш-Голынского месторождения калийной соли, которое находится в Прикарпатье. В качестве основы исследовательского комплекса были рассмотрены геофизические методы. Доказано, что для надежной оценки напряженно-деформированного состояния горных пород и, соответственно, для прогнозирования карстовых процессов и деформаций, связанных с наличием добывающих камер и развитием карста, можно успешно применять метод естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ). Описаны физические предпосылки применения метода, изложены основные постулаты классификации полей аномалий напряженности поля, разработан подход к оценке глубинности. На реальных примерах показаны результаты профильных и площадных исследований в пределах калийного месторождения соли, которые свидетельствуют об эффективности метода ЕИЭМПЗ для решения экологических и геологических задач.

Ключевые слова: эколого-геологическая проблема, геофизические методы исследования, залежи соли, природное импульсное электромагнитное поле Земли, карст, оседание земной поверхности.

УДК 550.8.056

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.12>О. Олійник, голов. фахівець сектору інтерпретації даних ГДС,
E-mail: orve@ukr.net;АТ "Укргазвидобування", Департамент геофізики,
вул. Кудрявська 26/28, м. Київ, 04053, Україна;
В. Антонюк, асп.,

E-mail: vitaliantoniuk@gmail.com;

І. Безродна, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: bezin3@ukr.net;С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОКЛАДІВ ГАЗУ УЩІЛЬНЕНИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ ТА ЛІТОЛОГО-ПЕТРОФІЗИЧНА ОЦІНКА ВІДКЛАДІВ ВЕРХНЬОГО ТА СЕРЕДНЬОГО КАРБОНУ СВЯТОГІРСЬКОЇ ПЛОЩІ

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

Проаналізовано світову практику з вивчення ущільнених порід-колекторів та продемонстровано деякі їхні літологічні та петрофізичні властивості на прикладі перспективних інтервалів Святогірської площі.

Метою даної роботи є встановлення особливостей петрофізичних властивостей ущільнених порід-колекторів верхнього та середнього карбону Святогірської площі за лабораторними та каротажними даними, а також прив'язка отриманих геофізичних результатів до літологічного складу та мінеральної будови порід, для оцінки перспектив газонасиченості.

Керновий матеріал, відібраний з чотирьох свердловин Святогірського родовища, дав змогу провести мікро- та макропетрографічний, а також петрофізичний аналіз порід. З використанням граничних значень коефіцієнта відкритої пористості (K_p), що становить для ущільнених порід-колекторів даного регіону 4,5 % у пластових та 4 % в атмосферних умовах, виділено у досліджуваній колекції 130 зразків, в яких K_p більше граничного значення. Гістограми розподілу виміряних петрофізичних властивостей зразків, відібраних з перспективних інтервалів, показали, що коефіцієнт відкритої пористості становить 4–7 %, а абсолютної газової проникності 0,01–2 мД (найбільша кількість зразків має $K_{пр} = 0,01$ мД).

Проведений аналіз результатів мікропетрографічного вивчення керна матеріалу показав, що скелет порід московського ярусу, який займає в середньому 70 % від об'єму, представлений на 41–47 % – кварцом, на 3–10,5 % – польовим шпатом та на 2,1–6 % – слюдистими мінералами. Цемент представлений в основному ілітовою глинистою складовою (14–17,5 %) з умістом кальциту (3–8,75 %).

За даними геофізичних досліджень свердловин, у ході інтерпретації були визначені підрахункові параметри, а саме – коефіцієнти глинистості, відкритої пористості та газонасичення, які дозволили виділити у розрізі свердловини №10 Святогірська інтервали порід-колекторів: 3836,4 – 3866,6 м і 4107,6–4140,4 м. Коефіцієнт відкритої пористості перспективних пластів коливається у межах – 4,5–9,5%, а коефіцієнт газонасичення – 50–65 %. За результатами опробування свердловини № 10 (до інтенсифікації) в інтервалі 4042–4150 м отримано приплив газу дебітом 19,0 тис. м³/д.

Підсумування отриманих результатів та порівняння зі світовими нафтогазовими практиками в області нетрадиційних джерел вуглеводнів говорить про те, що породи московського ярусу Святогірської площі належать до перспективних ущільнених порід-колекторів.

Ключові слова: газ ущільнених порід-колекторів, нетрадиційні джерела вуглеводнів, коефіцієнт пористості, коефіцієнт проникності.

Вступ. Значна кількість великих традиційних родовищ нафти та газу Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) є виснаженою. За останні роки за допомогою дорозвідки ідентифіковано незначні за запасами літологічні та стратиграфічні поклади. Перспективою нарощування видобутку вуглеводнів є освоєння глибокозалягаючих покладів, а також газу ущільнених порід-колекторів.

Пробуреними свердловинами на Святогірській, Сло-в'янській та Артемівській структурах східної частини ДДЗ вдалося отримати невеликий приток газу, за рахунок чого, при порівняно низьких колекторських властивостях порід, їх віднесено до свердловин з ущільненими породами-колекторами. Проте, на жаль, і на даний час недостатньо методичних засад для точного виділення, ідентифікації та розробки покладів газу ущільнених порід на цих об'єктах.

Метою даної роботи є проведення аналізу досліджень в області ущільнених порід-колекторів на основі аналізу літологічних та петрофізичних властивостей порід касимівського та московського ярусів Святогірської площі східної частини ДДЗ.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. Вперше термін ущільнені породи-колектори (tight gas) було введено у США у 1970-х рр. для отримання податкових пільг при видобутку вуглеводнів з таких покладів. Складність та витрати при видобутку пояснювалися низькими фільтраційними властивостями,

коефіцієнт абсолютної проникності ($K_{пр}$) в яких становить менше 0,1 мД.

На сьогодні ущільненими породами-колекторами називають такі, в яких неможливо отримати промисловий приплив газу без інтенсифікації. Хоча це, на думку авторів, також дискусійне питання. Промисловий приплив газу контролюється економічною рентабельністю при видобутку, а також наявністю інфраструктури для подальшої переробки чи транспортування вуглеводнів. Також з глибокозалягаючих інтервалів з високим пластовим тиском та потужністю можна досягнути гарних показників притоку вуглеводнів навіть при $K_{пр} = 0,001$ мД, на відміну від неглибоких інтервалів малої потужності з низькими пластовими тисками та значенням $K_{пр}$ у декілька мД, в яких економічно рентабельний приплив можна отримати лише після гідророзриву (Masters, 1979).

Вплив вищезгаданих особливостей покладів при видобутку вуглеводнів представлений у рівнянні псевдовстановленого притоку флюїду (Slider, 1983) в інтервалі

$$q = \frac{0.56kh(p_e - p_w)}{\mu B_g \ln(r_e / r_w)}, \quad (1)$$

де q – приток флюїду при стандартних поверхневих умовах, ст. м³/добу; k – коефіцієнт проникності, мД; h – потужність інтервалу, з якого відбувається приток флюїду, м; p_e – середнє значення пластового тиску, МПа; p_w – тиск у стовбурі свердловини, МПа; B_g – об'ємний коефіцієнт пластового газу (відношення об'єму газу в пласті до

об'єму газу на поверхні) $\text{м}^3/\text{пл. умов}/\text{м}^3/\text{поверхн. умов}$; μ – в'язкість флюїду в сПз ($10^{-2} \text{ Па}\cdot\text{с}$); r_e – радіус зони дренавання, м; r_w – радіус свердловини, м.

Беручи до уваги вищесказане, можна дійти висновку, що не все так однозначно при ідентифікації та віднесенні покладів до ущільнених порід-колекторів.

За літологічними, геомеханічними та петрофізичними властивостями резервуарів ущільнених порід-колекторів можуть бути доволі різноманітними, а саме: гомогенними та з наявністю вторинних пустот; складені одним або багатьма інтервалами; з високими або ж низькими пластовими тисками та температурою, а також можуть залягати на різних глибинах.

На відміну від горючих сланців, в яких акумуляція вуглеводнів відбувається переважно у материнських породах, та традиційних покладів, в яких вуглеводні, до того як акумулюватися в пастці, можуть мігрувати досить значним шляхом, для забезпечення нафтогазоносності ущільнені породи-колектори повинні знаходитися у безпосередній близькості до джерел генерації (Zou et al., 2017).

Згідно з роботою C.W. Spencer (Spencer, 1989), в якій порівнювалися петрофізичні, літологічні та геомеханічні властивості традиційних та ущільнених пісковиків, ущільнені газонасні породи-колектори характеризуються такими властивостями та параметрами:

- коефіцієнт відритої пористості становить $3\pm 12\%$;
- переважаючим типом пустот зазвичай є вторинні пустоти (ущільнення) та мікротріщини, можливий також невеликий вміст пустот міжгранулярного типу;
- капіляри, що з'єднують пустоти, малого діаметру та значної звивистості;
- вміст глинистих мінералів, що заповнюють пустотний простір, становить від 0 до майже 20 %;
- коефіцієнт відкритої пористості складно визначити за даними ГДС;
- коефіцієнт водонасичення коливається у межах $45\div 75\%$;
- коефіцієнт ефективної проникності у пластових умовах становить $-0,1 \div +0,0005 \text{ мД}$;
- у мінеральному складі переважає кварц $60 \div 90\%$, наявні польовий шпат, слюди та глинисті мінерали, а також карбонатні у складі цементу;
- коефіцієнт об'ємної густини – $2650 \div 2740 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- пластові тиски становлять від субнормального до аномального;
- розрахунковий коефіцієнт вилучення газу – $25\div 50\%$.

Описані вище характеристики притаманні для ущільнених газонасних пісковиків Західної частини США, проте авторами вище описано, що даний тип резервуарів може значно відрізнятися за своїми петрофізичними, літологічними та геомеханічними властивостями.

Як показують дослідження у двох найбільш продуктивних басейнах ущільнених колекторів США – Greater Green River та East Texas, після 25 років розробки трьох газонасних формацій прогнозований коефіцієнт вилучення вуглеводнів становить від 70 до 85 % (Ma and Holditch, 2015). Високий ступінь вилучення газу пояснюється гарно змодельованими параметрами, а також якісно виконаним гідророзривом пласта, що дозволило з'єднати системою механічних тріщин три газонасні формації.

В ущільнених колекторах зазвичай пустоти розподілені нерівномірно, з'єднані дрібними капілярами та не утворюють гарно з'єднаної системи. Забезпечення руху флюїду відбувається не тільки за рахунок пустот, а й розміру їхнього гирла та капілярів.

Дослідження деяких резервуарів ущільнених колекторів США показали, що розмір гирла пустот або ж діаметр капіляра лежить у межах $10^{-2}\text{--}10^0 \text{ мкм}$ (Nelson,

2009). Оскільки нанопустоти вміщують невелику кількість молекул флюїду (порівняно з пустотами порід-колекторів традиційного типу), взаємодія між молекулами, а також молекулами та стінками пустот, зростає. За рахунок цього шлях руху молекул флюїду є обмеженим геометрією пустотного простору порід. Ефект утримання на стінках пустот зростає при співвідношенні розміру молекул флюїду до діаметра капіляра менше ніж у 20 разів (Bahadori, 2016). Даним ефектом пояснюється значна кількість капілярно зв'язаної води та вуглеводнів в ущільнених колекторах.

Розміри гирла пустот та капілярів також контролюються наявністю глинистих мінералів та щілиноподібних пустот, що характеризують ефективну ємність пустотного простору. При збільшенні вмісту глинистих мінералів зменшується розмір пустот та їх гирла, а також, залежно від типу даних мінералів, збільшується у різній мірі кількість абсорбційно зв'язаної води. Проте утворення мікротріщин у глинистій складовій порід може утворювати додаткові канали фільтрації в ущільнених породах-колекторах (Golab et al., 2010).

Покращені фільтраційні властивості спостерігаються за рахунок наявності пустот розчинення внаслідок вилучування карбонатних мінералів, а також при утворенні тріщин та мікротріщин внаслідок тектонічних процесів.

Складність у вилученні газу з щільних пісковиків полягає в наявності високого вмісту абсорбційно та капілярно зв'язаної води, що й показано вище, а також невеликого вмісту мобільних пластових вод за наявності системи мікротріщинуватості. При розкритті пласта, а також після інтенсифікації дані типи пластових вод надходять до свердловини, що впливає на видобуток газу. Прикладом слугують поклади газу в щільних пісковиках на родовищах регіонів Rocky Mountains та Greater Green River (Spencer, 1985; Куровець та ін., 2013).

Коефіцієнт вилучення вуглеводнів ущільнених газонасних колекторів за наявності мобільної води в інтервалах є нижчим, ніж в таких, що не вміщують води. На характер руху флюїду таких інтервалів впливає градієнт порового тиску, який контролює потік мобільної води крізь пустоти невеликого радіуса, чутливість проникності до наявності двох фаз флюїду та перепад тисків у свердловині, що впливає на коефіцієнт фазової проникності. Поєднання наведених ефектів є контролюючим фактором у визначенні характеру руху флюїду та продуктивності ущільнених колекторів з вмістом мобільної води (Cao et al., 2017).

Враховуючи, що розробка покладів ущільнених порід-колекторів відбувається після гідророзриву пласта або ж по системі природних тріщин, рух флюїду в даних інтервалах не підкоряється закону Дарсі. Тобто він є нелінійним. У літературі даний тип руху флюїду називається турбулентним та пояснюється тим, що при високій швидкості переміщення газу спостерігається відхилення від закону Дарсі внаслідок інерції, що у подальшому переростає в явище турбулентності (Tiab and Donaldson, 2015). Проте не завжди присутнє тільки прискорення швидкості руху флюїду, враховуючи, що перебіг його може відбуватися по системі пустотного простору з подвійним типом пористості (міжзернова та тріщинна), присутнє також явище сповільнення (рух флюїду є преламінарним) при проходженні через зв'язані інтергранулярні пустоти та контакти з пропановими пачками внаслідок тертя (що утримують тріщини гідророзриву від захоплення) (Liu et al., 2018).

Форхеймом запропонована квадратична нерівність для опису руху флюїду в умовах як ламінарного, так і пре- та постламінарного режимів (Tiab and Donaldson, 2015):

$$-\frac{dp}{dL} = \frac{\mu_g v}{k} + \beta \rho v^2, \quad (2)$$

де p – тиск в атм.; L – довжина зразка, см; μ_g – в'язкість флюїду, сПз; k – коефіцієнт проникності, мД; v – швидкість флюїду, см/с; ρ – густина флюїду, г/см³; β – коефіцієнт турбулентності або відхилення від закону Дарсі, атм*с²/г.

Для ідентифікації інтервалів нетрадиційних покладів вуглеводнів, в яких після гідророзриву пласта утвориться система тріщин, що дозволить збільшити коефіцієнт вилучення вуглеводнів та найкращим способом розробляти поклад, використовуються індекси розтріскування (fractability index) та крихкості (brittleness index). Дані параметри пов'язані з геомеханічними та пружними властивостями, а також мінеральною будовою порід, що включає крихкість гірських порід, режим напруження у покладі, а також наявність та розвиток природних тріщин (Mews et al., 2019; Weng et al., 2016).

Важливими характеристиками при вивченні ущільнених колекторів є також детальне вивчення коефіцієнтів відкритої пористості, нафтогазонасичення, абсолютної газової проникності, літології та мінерального складу. Окрім цього, необхідно врахувати хімічні властивості материнських порід у розрізі, а саме відбиваючи здатність вітриніту, термічну зрілість та вміст органічної речовини у породах (Passey et al., 2010).

У роботі (Мухайлов та ін., 2014) проаналізовано та узагальнено результати петрографічного, петрофізичного та промислово-геофізичного вивчення відкладів пермського віку, а також верхнього та середнього ярусів карбону свердловини № 10 Святогірська. Протягом дослідження проведено мікро- та макропетрографічне вивчення порід глинисто-піщаної товщі, визначено відбиваючи здатність вітриніту (R_o), масові частки елементів, а саме вміст органічної речовини (S_{org}), а також уранових та карбонатних мінералів. Хімічний аналіз проб дозволив отримати такі значення для загального вмісту органічного вуглецю (ТОС), S_{org} та R_o алевритистих порід:

- для відкладів верхнього карбону ТОС становить 2,3 та 3,5, S_{org} – 3,6–4,5 і 1,2 % та R_o – 1;
- для відкладів московського ярусу: ТОС – 2,9 та 2,2, S_{org} – 4,2 і 2,8 %, R_o – 1,47.

Окрім цього, авторами проведені кількісну інтерпретацію промислово-геофізичних даних, визначені коефіцієнти глинистості, відкритої пористості та вмісту органічної речовини за результатами інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин (ГДС), зокрема, за даними акустичного каротажу (АК) та нейтронного гамакаротажу (НГК). Результати інтерпретації ГДС показали високий вміст S_{org} , що корелюється з результатами хімічного аналізу керну на глибині 3848 м. Спостерігаються також аномалії вмісту S_{org} (1 %) в інтервалі 3880–3918 м.

Проаналізовані результати досліджень з вивчення материнських порід за допомогою хімічного аналізу можуть бути використані при виділенні перспективних інтервалів газу ущільнених колекторів Святогірської площі, враховуючи, що ущільнені пісковики можуть стати покладом вуглеводнів тільки за наявності у даному басейні материнських порід, тобто джерел генерації вуглеводнів.

Результати. Авторами проведений аналіз літологічних та петрофізичних властивостей ущільнених порід касимівського та московського ярусу Святогірської площі.

Детальні мікропетрографічні дослідження кернового матеріалу дали змогу кількісно визначити вміст породотвірних мінералів та фаціальні особливості утворення інтервалів ущільнених порід (Лизанець та ін., 2019). Аналіз даних досліджень для перспективних ярусів Святогірської площі представлений нижче.

Породи касимівського ярусу верхнього карбону (C_3^1 К-6) у середньому на 70 % складаються з уламкових зерен мінералів, зокрема, кварцу – 39–47 %, польових

шпатів – 4–7,5 %, слюдистих мінералів – близько 4 %. Цемент займає в середньому 30 % та представлений: ілітовою глинистою складовою (14–18 %), кальцитом (5–8,75 %), а також 5–10 % та 1,2–1,75 % кварцу у вигляді облямівок та інтерстицій відповідно.

За структурою дані зразки є тонкодрібнозернистими, текстура полого-хвиляста, за фаціальною належністю це відклади русла річки. Визначений у даних зразках K_n варіює у межах 2,5–3,2 %.

У породах московського ярусу (C_2m) горизонту М-1 мінерали матриці порід займають у середньому 70 % та представлені: 41–47 % кварцу, 3–10,5 % польових шпатів, 2,1–6 % слюдистих мінералів. Цемент представлений в основному ілітовою глинистою складовою (14–17,5 %), вміст кальциту становить 3–8,75 %, кварцу у вигляді облямівок та інтерстицій – 0,75–2,8 % та 1,75–11 % відповідно. K_n змінюється у межах 3,6–4 %.

Зразки порід московського ярусу (C_2m) горизонту М-2 представлені пісковиками, що в середньому на 60 % складені уламковими мінералами матриці, з яких кварц займає 34–41 %, плагіоклази – 5,7–10 % та слюдисті мінерали – 1,7–1,95 %. Цемент складається в середньому на 19 % з ілітової глинистої складової, а також на 5–8,5 % з кальциту та 3–6 % з доломіту, кварцу у вигляді облямівок та інтерстицій 1,2–3,6 % та 7,6–10 % відповідно. K_n коливається у межах 3,15–3,7 %. Відклади московського ярусу за фаціальними особливостями відносяться до одиночного або ж розгалуженого русла річки.

На рис. 1. представлено мікрофотографії шліфів ущільнених пісковиків касимівського ярусу верхнього карбону та московського ярусу середнього карбону, як встановлено з аналізу петрографічного опису та мікрофотографій шліфів, інтервали московського ярусу складені дрібно-, крупно- та середньозернистими уламками, що позитивно впливає на колекторські властивості порід.

Граничне значення пористості ($K_{n,gr}$) для традиційних порід-колекторів верхнього та середнього карбону ДДЗ становить у середньому 10,5 %, для ущільнених колекторів даних горизонтів $K_{n,gr} = 4,5$ %. Проте для точного визначення даного коефіцієнта необхідним є зв'язати коефіцієнти пористості, проникності та діаметр гирла пустот з результатами випробування свердловин на приплив флюїду (Cui et al., 2017), що забезпечить більш надійні результати при ідентифікації ущільнених порід-колекторів ДДЗ.

Проаналізовано значення K_n , що було виміряно на зразках, з яких були виготовлені шліфи. Хоча зразки були відібрані з перспективного інтервалу, тільки у пробах горизонту М-1 значення K_n відповідає граничному (зазвичай виміряний коефіцієнт пористості у лабораторії є нижчим ніж у пластових умовах, на це впливає наявність пластового тиску, тому ми можемо з обережністю віднести дані породи до колекторів), але всі отримані результати будуть використані в подальшому при петрофізичній характеристиці та побудові мультимінеральної моделі за каротажними даними.

У досліджуваних шліфах ущільнених пісковиків касимівського та московського ярусів не виявлено присутності відкритих мікротріщин ні на контакті мінералів, ні в зернах кварцу та іліту. Наявні мікротріщини в уламкових зернах переважно заповненні глинистим цементом. Проте однозначно зробити висновок про відсутність вторинних пустот та мікротріщин неможливо, беручи до уваги обмежену кількість петрографічних даних.

Для більш точного уявлення про петрофізичні властивості авторами побудовані гістограми розподілу коефіцієнтів пористості та проникності чотирьох свердловин (рис. 2) Святогірської площі, керновий матеріал яких представлений відкладами касимівського та московського ярусів. На рис. 2 різними кольорами виділено свердловини Святогірської площі, з яких було піднято керновий матеріал.

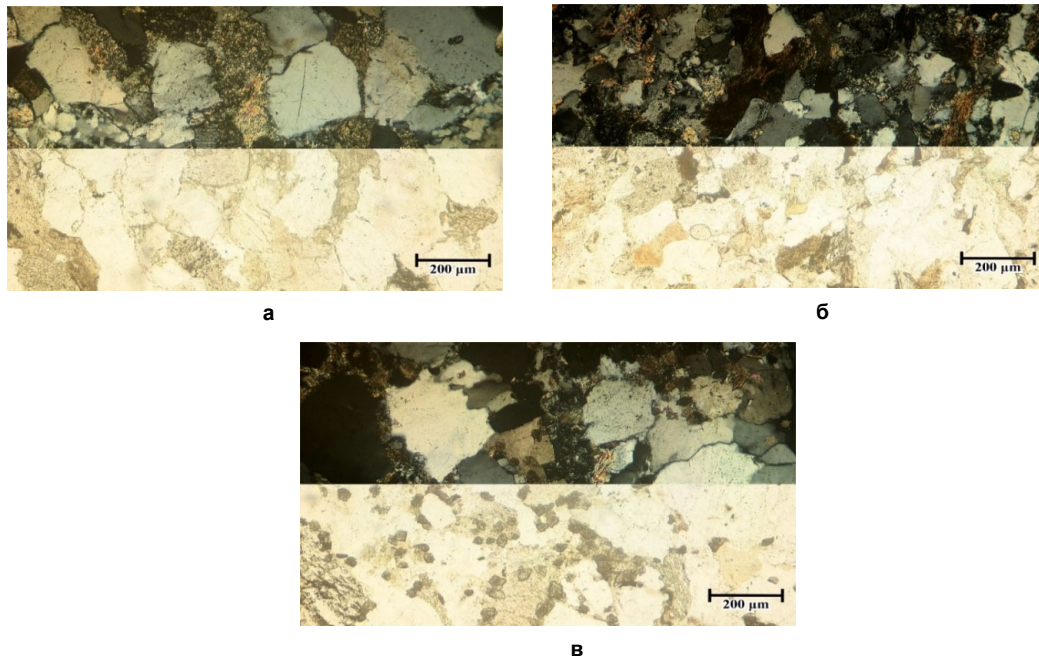


Рис. 1. Мікрофотографії шліфів ущільнених пісковиків:

а – касимівського (К-6) ярусу верхнього карбону; б та в – московського ярусу середнього карбону (горизонти М-1 та М-2 відповідно)

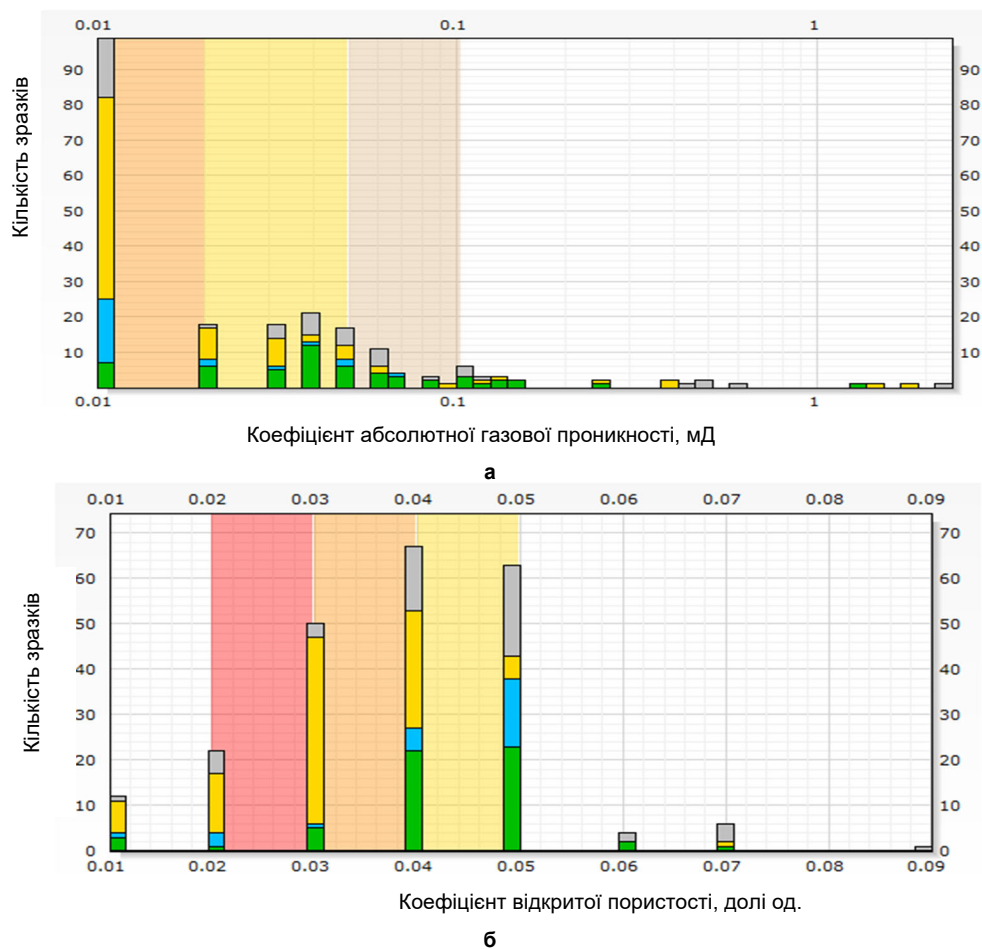


Рис. 2. Гістограми розподілів параметрів ущільнених пісковиків

касимівського та московського ярусів Святогірської площі:

а – коефіцієнта абсолютної газової проникності; б – коефіцієнта відкритої пористості

Згідно з рис. 2, а, коефіцієнт абсолютної газової проникності характеризується логарифмічним розподілом з мінімальним значенням 0,01 мД та максимальним – 2 мД. На жаль, використана при досліді апаратура не дозволяє дослідити зразки з $K_{пр}$, що менше 0,01 мД, тому

зразки з ультранизькою проникністю вказані як непроникні або ж з $K_{пр}$ 0,01 мД. Отримані результати показують, що основна кількість зразків (100) мають низьке значення коефіцієнта проникності (0,01 мД), проте наявні також такі, в яких $K_{пр}$ становить більше 1 мД, що, на

думку авторів, викликано природною або механічною (утвореною під час буріння чи відбору кернового матеріалу) направленою мікротріщиноватістю.

Гістограма коефіцієнта відкритої пористості (рис. 2, б) характеризується нормальним розподілом, а значення параметру лежать у межах 1–9 %. Як вже сказано, для даних порід запропонованим граничним значенням K_n є 4,5 %, враховуючи, що дане значення є наближеним, а також визначеним за результатами даних ГДС (тобто в пластових умовах), зразки з $K_n = 4$ % за керном можна з певними допущеннями віднести до подібних порід-колекторів. З урахуванням цього перспективний розріз представлено 130 зразками з відібраного кернового матеріалу, до яких переважно належать породи московського ярусу.

Визначення петрофізичних та підрахункових параметрів безпосередньо у пластових умовах дозволяє більш точно оцінити резервуар у процесі розвідки та введення у розробку, тому авторами визначені властивості ущільнених порід-колекторів за даними ГДС.

Комплекс каротажних досліджень, що використовувався авторами у даній роботі, включає: радіоактивні методи – гама (ГК) та двухзондовий нейтрон-нейтронний каротаж (ДННК), акустичний каротаж (АК), питомий електричний опір, виміряний фокусованим зондом бокового

каротажу (БК), діаметр стовбуру свердловини. Розрахунок коефіцієнта глинистості проводився за рівнянням Ларіонова для "древніх порід", коефіцієнти загальної та відкритої пористості розраховувалися за рівнянням середнього часу за даними АК, а також з використанням нейтронного каротажу з подальшим введенням поправки за вміст глинистих мінералів. Враховуючи, що як і при петрографічних дослідженнях, так і за інтерпретацією каротажних даних у досліджуваних перспективних інтервалах присутні глинисті мінерали розрахунок коефіцієнта газонасичення проводився з використанням рівняння "Подвійної води" (Clavier et al., 1984).

Інтерпретація каротажних даних дозволила ідентифікувати у розрізі московського ярусу свердловини № 10 перспективні поклади газу ущільнених колекторів – інтервали: 3836,4–3866,6 м, а також 4107,6–4140,4 м (рис. 3). Коефіцієнт відкритої пористості перспективних пластів коливається у межах – 4,5–9,5 %, а коефіцієнт газонасичення – 50–65 %. Коефіцієнт глинистості визначений у ході інтерпретації і змінюється у межах від 0,1 до 14 %, що відповідає визначеному за мікроскопічними дослідженнями та говорить про те, що пустотний простір досліджуваних порід заповнений глинистими мінералами, що знижують фільтраційні та ефективні ємнісні властивості.

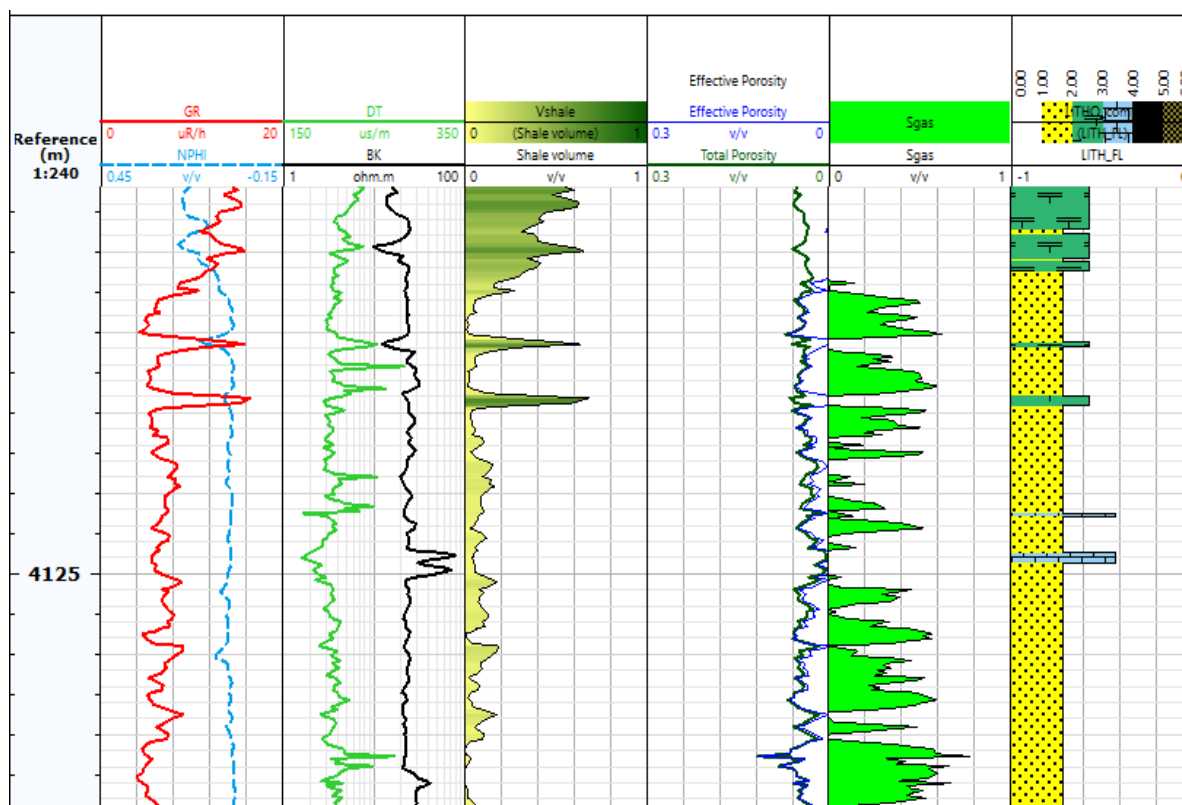


Рис. 3. Планшет з каротажними діаграмами та підрахунковими параметрами, а також літологією розрізу свердловини № 10 Святогірської площі

Згідно з роботою (Дудніков, 2012) при опробуванні порід московських відкладів свердловини № 10 в інтервалі глибин 4042–4150 м до інтенсифікації отримано промисловий приплив газу дебітом 19,0 тис. м³/д. За рахунок цього, а також зробленого петрофізичного аналізу та визначення підрахункових параметрів за даними ГДС, можна з впевненістю встановити, що інтервали московського ярусу представлені ущільненими породами-колекторами.

Висновки. За оглядом світової практики з вивчення ущільнених порід-колекторів продемонстровано деякі їх

літологічні та петрофізичні властивості на прикладі перспективних інтервалів Святогірської площі.

Авторами проведений детальний аналіз геомеханічних, петрографічних та петрофізичних властивостей ущільнених порід-колекторів касимівського та московського ярусів Святогірської площі. Детально показано закони, за якими відбувається рух флюїду, а також охарактеризовано розміри і гирла пустот та капілярів даних порід.

Проведений петрографічний аналіз довів, що ущільнені пісковики касимівського та московського ярусів Святогірської площі на 60–70 % складаються з уламкових

мінералів, а також ілітової складової глинистого та карбонатного цементу. Аналіз гістограм розподілу коефіцієнтів пористості та проникності по чотирьох свердловинах довів, що коефіцієнт абсолютної проникності має логарифмічний розподіл та лежить у межах 0,01–2 мД (найбільша кількість зразків з $K_{пр} = 0,01$ мД), а коефіцієнт відкритої пористості 1–9,5 %.

Окрім цього, за результатами інтерпретації даних ГДС у розрізі московського ярусу свердловини № 10 Святогірська виділено ущільнені породи-колектори в інтервалах 3836,4–3866,6 м, а також 4107,6–4140,4 м, що характеризуються значеннями коефіцієнтів відкритої пористості 4,5–9,5 % та газонасичення 50–65 %.

Проведений аналіз петрографічних і петрофізичних досліджень, та інтерпретації каротажних даних з поєднанням результатів гідродинамічного опробування інтервалів дозволили віднести породи московського ярусу до ущільнених порід-колекторів.

У подальшому авторами планується за допомогою каротажних та лабораторних даних визначити вміст органічної речовини (Карпенко та ін., 2014) та виділити материнські породи Святогірської площі, а також визначити структуру пустотного простору порід (Вижва та Безродна, 2016) у пластових умовах, узагальнити дану інформацію з результатами лабораторних досліджень механічних властивостей для виділення зон найбільш ефективного проведення гідророзриву пласта вивчених об'єктів.

Список використаних джерел

- Вижва, С., Безродна, І. (2016). Визначення структури пустотного простору складнопобудованих порід за даними петроакустичних досліджень Семиренківської площі. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 3, 11–17.
- Дудніков, М. (2012). Перспективи нафтогазоносності південно-східної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 58, 36–40.
- Карпенко, О., Башкіров, Г., Карпенко, І. (2014). Визначення вмісту органічної речовини в гірських породах за геофізичними даними. *Вісник Київського національного університету. Геологія*, 3, 71–76.
- Куровець, В.І., Михайлов, В.А., Зейкан, О.Ю., Коваль, А.М., Загнітко, В.М., Гуров, Є.П., ... Кожушок, О.Д. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України: огляд проблеми. Кн. І. Київ: Ніка-Центр.
- Лизанець, В., Бухтатий, В., Степанов, О., Дорошкевич, В. (2019). Дослідження літофациальних та емнісно-фільтраційних властивостей порід керну пошуково-розвідувальних свердловин. Харків.
- Михайлов, В.А., Вижва, С.А., Загнітко, В.М. та ін. (2014). Нетрадиційні джерела вуглеводнів України. Кн. IV. Східний нафтогазоносний регіон. Аналітичні дослідження. Київ: Ніка-центр.
- Bahadori, A. (2016). Fluid phase behavior for conventional and unconventional oil and gas reservoirs. Gulf Professional Publishing.
- Cao, R., Ye, L., Lei, Q., Chen, X., Ma, Y.Z., Huang, X. (2017). Gas-water flow behavior in water-bearing tight gas reservoirs. *Geofluids*, 2017.
- Clavier, C., Coates, G., Dumanoir, J. (1984). Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 24 (02), 153–168.
- Cui, H., Zhong, N., Li, J., Wang, D., Li, Z., Hao, A., Liang, F. (2017). Study on the lower limits of petrophysical parameters of the Upper Paleozoic tight sandstone gas reservoirs in the Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2 (1), 21–28.
- Golab, A.N., Knackstedt, M.A., Averdunk, H., Senden, T., Butcher, A.R., Jaime, P. (2010). 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones. *The Leading Edge*, 29 (12), 1476–1483.
- Liu, Q., Cheng, Y., Dong, J., Liu, Z., Zhang, K., Wang, L. (2018). Non-Darcy Flow in Hydraulic Flushing Hole Enlargement-Enhanced Gas Drainage: Does It Really Matter? *Geofluids*, 2018.
- Ma, Y.Z., Holditch, S. (2015). Unconventional oil and gas resources handbook: Evaluation and development. Gulf professional publishing.
- Masters, J.A. (1979). Deep basin gas trap, western Canada. *AAPG Bulletin*, 63 (2), 152–181.
- Mews, K.S., Alhubail, M.M., Barati, R.G. (2019). A Review of Brittleness Index Correlations for Unconventional Tight and Ultra-Tight Reservoirs. *Geosciences*, 9 (7), 319.
- Nelson, P.H. (2009). Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales. *AAPG Bulletin*, 93 (3), 329–340.
- Passey, Q.R., Bohacs, K., Esch, W.L., Klimentidis, R., Sinha, S. (2010). From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir-geologic and petrophysical characterization of unconventional shale gas reservoirs. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers.
- Slider, H.C. (1983). Worldwide practical petroleum reservoir engineering methods. PennWell Books.
- Spencer, C.W. (1985). Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region. *Journal of Petroleum Technology*, 37 (07), 1–308.
- Spencer, C.W. (1989). Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in western United States. *AAPG Bulletin*, 73 (5), 613–629.
- Tiabi, D., Donaldson, E.C. (2015). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties: Fourth Edition. Elsevier.
- Vyzhva S., Bezrodna I. (2016). Determination of the void space structure of complex rocks using the petroacoustic studies data from the Semyrenkivska area. *Visnyk of Taras Shevchenko national university of Kyiv. Geology*, 3, 11-17. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.74.02>.
- Weng, X., Cohen, C.-E., Kresse, O. (2016). Impact of Preexisting Natural Fractures on Hydraulic Fracture Simulation. In *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook* (pp. 289–331). Elsevier.
- Zou, C., Zhu, R., Tao, S., Hou, L., Yuan, X., & Zhang, G. (2017). Unconventional petroleum geology (Second). Elsevier.

petrophysical characterization of unconventional shale gas reservoirs. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers.

Slider, H.C. (1983). Worldwide practical petroleum reservoir engineering methods. PennWell Books.

Spencer, C.W. (1985). Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region. *Journal of Petroleum Technology*, 37 (07), 1–308.

Spencer, C.W. (1989). Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in western United States. *AAPG Bulletin*, 73 (5), 613–629.

Tiabi, D., Donaldson, E.C. (2015). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties: Fourth Edition. Elsevier.

Weng, X., Cohen, C.-E., Kresse, O. (2016). Impact of Preexisting Natural Fractures on Hydraulic Fracture Simulation. In *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook* (pp. 289–331). Elsevier.

Zou, C., Zhu, R., Tao, S., Hou, L., Yuan, X., Zhang, G. (2017). Unconventional petroleum geology (Second). Elsevier.

References

- Bahadori, A. (2016). Fluid phase behavior for conventional and unconventional oil and gas reservoirs. Gulf Professional Publishing.
- Cao, R., Ye, L., Lei, Q., Chen, X., Ma, Y.Z., Huang, X. (2017). Gas-water flow behavior in water-bearing tight gas reservoirs. *Geofluids*, 2017.
- Clavier, C., Coates, G., Dumanoir, J. (1984). Theoretical and experimental bases for the dual-water model for interpretation of shaly sands. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 24 (02), 153–168.
- Cui, H., Zhong, N., Li, J., Wang, D., Li, Z., Hao, A., Liang, F. (2017). Study on the lower limits of petrophysical parameters of the Upper Paleozoic tight sandstone gas reservoirs in the Ordos Basin, China. *Journal of Natural Gas Geoscience*, 2 (1), 21–28.
- Dudnikov M. (2012). Prospects for oil and gas potential of the south-eastern part of the Dnieper-Donetsk basin. *Visnyk of Taras Shevchenko national university of Kyiv. Geology*, 58, 36–40.
- Golab, A.N., Knackstedt, M.A., Averdunk, H., Senden, T., Butcher, A.R., Jaime, P. (2010). 3D porosity and mineralogy characterization in tight gas sandstones. *The Leading Edge*, 29 (12), 1476–1483.
- Karpenko O., Bashkirov G., Karpenko I. (2014). Geophysical data: estimating organic matter in rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko national university of Kyiv. Geology*, 66, 71-76
- Kurovets V., Mykhailov V., Zeikan O., Koval A., Zagnitko V., Hurov Y., ... Kozhushok O. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book I. K.: Nika-Centre.
- Liu, Q., Cheng, Y., Dong, J., Liu, Z., Zhang, K., Wang, L. (2018). Non-Darcy Flow in Hydraulic Flushing Hole Enlargement-Enhanced Gas Drainage: Does It Really Matter? *Geofluids*, 2018.
- Ma, Y.Z., Holditch, S. (2015). Unconventional oil and gas resources handbook: Evaluation and development. Gulf professional publishing.
- Masters, J.A. (1979). Deep basin gas trap, western Canada. *AAPG Bulletin*, 63 (2), 152–181.
- Mykhailov V., Vyzhva S., Zagnitko V. et al. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. Book 4. Eastern oil-gas-bearing region. Analytical Investigation. K.: Nika-Centre.
- Mews, K. S., Alhubail, M. M., & Barati, R. G. (2019). A Review of Brittleness Index Correlations for Unconventional Tight and Ultra-Tight Reservoirs. *Geosciences*, 9(7), 319.
- Nelson, P.H. (2009). Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales. *AAPG Bulletin*, 93 (3), 329–340.
- Lyzanets A., Bukhtaty V., Stepanov O., Doroshkevych V. (2019). Investigation of lithofacial and capacitive filtration properties of rocks core samples of exploration wells. Kharkiv.
- Passey, Q.R., Bohacs, K., Esch, W.L., Klimentidis, R., Sinha, S. (2010). From oil-prone source rock to gas-producing shale reservoir-geologic and petrophysical characterization of unconventional shale gas reservoirs. *International Oil and Gas Conference and Exhibition in China*. Society of Petroleum Engineers.
- Slider, H.C. (1983). Worldwide practical petroleum reservoir engineering methods. PennWell Books.
- Spencer, C.W. (1985). Geologic aspects of tight gas reservoirs in the Rocky Mountain region. *Journal of Petroleum Technology*, 37 (07), 1–308.
- Spencer, C.W. (1989). Review of characteristics of low-permeability gas reservoirs in western United States. *AAPG Bulletin*, 73 (5), 613–629.
- Tiabi, D., Donaldson, E.C. (2015). Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties: Fourth Edition. Elsevier.
- Vyzhva S., Bezrodna I. (2016). Determination of the void space structure of complex rocks using the petroacoustic studies data from the Semyrenkivska area. *Visnyk of Taras Shevchenko national university of Kyiv. Geology*, 3, 11-17. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.74.02>.
- Weng, X., Cohen, C.-E., Kresse, O. (2016). Impact of Preexisting Natural Fractures on Hydraulic Fracture Simulation. In *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook* (pp. 289–331). Elsevier.
- Zou, C., Zhu, R., Tao, S., Hou, L., Yuan, X., & Zhang, G. (2017). Unconventional petroleum geology (Second). Elsevier.

Надійшла до редколегії 21.12.19

O. Oliynyk, Chief specialist of well logging data interpretation sector,
E-mail: orve@ukr.net;
JSC "UkrGasvydobuvannya", Department of Geophysics,
26/28 Kudriavskaya Str., Kyiv, 04053, Ukraine;
V. Antoniuk, PhD student, E-mail: vitaliantoniuk@gmail.com;
I. Bezrodna, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: bezin3@ukr.net;
S. Vyzhva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhva_s@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivskaya Str., Kyiv, 03022, Ukraine

ANALYSIS OF TIGHT GAS RESERVOIRS AND LITHOLOGICAL-PETROPHYSICAL ASSESSMENT OF UPPER AND MIDDLE CARBONIFEROUS STRATA OF SVYATOGORSKA AREA

The paper concerns the analysis of the world practice in the study of tight gas reservoirs and some of their lithological and petrophysical properties are demonstrated on the example of Svyatogorska Area perspective intervals. The purpose of this work is to establish the features of petrophysical properties of tight gas reservoirs from the upper and middle Carboniferous strata of Svyatogorska area according to laboratory and well logging data and matching the obtained geophysical results with lithological composition and mineral structure of rocks to assess gas prospects. The laboratory investigation on core samples included petrographic and petrophysical analysis of rocks. The effective porosity cutoff value for tight gas reservoirs of the studied area is 4,5 % under reservoir conditions and 4 % in the laboratory settings. 130 core samples were selected, for which the effective porosity is larger than the cutoff value. The histogram of effective porosity and absolute permeability distribution for tight gas intervals shows that PHI is in the range of 4–7 % and $K = 0.01–2$ mD (the largest number of samples has $K = 0.01$ mD). Conducted analysis of the micropetrographic study results of the core material showed that the matrix of the Moscovian stage rocks takes an average of 70 % from the volume, represented by 41–47 % quartz, 3–10,5 % – feldspar and 2,1–6 % – mica minerals. Cement is represented mainly by illite clay component (14–17,5 %) with calcite content (3–8,75 %). According to the formation evaluation of the well logging data clay volume, effective porosity and gas saturation were calculated for the well №10 Svyatogorska area. The intervals: 3836,4–3866,6 m and 4107,6–4140,4 m were indicated as tight gas reservoirs. The effective porosity of promising formations varies in the range - 4,5–9,5 %, and the gas saturation in 50–65 %. According to the results of well testing – 19,0 thousand m³/d flow rate of gas was obtained in the interval 4042–4150 m of the well № 10 (before intensification). Summarizing the obtained results and comparing with the world oil and gas practices in the field of unconventional sources of hydrocarbons one suggests that the rocks of the Moscow strata of Svyatogorska Area are tight gas reservoirs.

Keywords: tight gas reservoirs, unconventional hydrocarbon sources, porosity, permeability.

O. Олейник, главный специалист сектора интерпретации данных ГИС,
E-mail: orve@ukr.net;
АО "УкрГаздобыча", Департамент геофизики,
ул. Кудрявская, 26/28, г. Киев, 04053, Украина;
В. Антониук, асп., E-mail: vitaliantoniuk@gmail.com;
И. Безродная, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: bezin3@ukr.net;
С. Выжва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.net.ua;
2Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗАЛЕЖЕЙ ГАЗА УПЛОТНЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ И ЛИТОЛОГО-ПЕТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХНЕГО И СРЕДНЕГО КАРБОНА СВЯТОГОРСКОЙ ПЛОЩАДИ

Проведен анализ мировой практики по изучению уплотненных пород-коллекторов и представлены некоторые их литологические и петрофизические свойства на примере перспективных интервалов Святогорской площади. Целью данной работы является установление особенностей петрофизических свойств уплотненных пород-коллекторов верхнего и среднего карбона Святогорской площади по лабораторным и каротажным данным, а также привязка полученных геофизических результатов к литологическому составу и минеральному строению пород для оценки перспектив газоносности. Керновый материал, отобранный из четырех скважин Святогорского месторождения, позволил провести микро- и макропетрографический, а также петрофизический анализ пород. С использованием граничных значений коэффициента открытой пористости ($K_{пр}$), который составляет для уплотненных пород-коллекторов данного региона 4,5 % в пластовых и 4 % в атмосферных условиях, выделено в исследуемой коллекции 130 образцов, в которых $K_{пр}$ – больше порогового значения. Гистограммы распределения измеренных петрофизических свойств образцов, отобранных из перспективных интервалов, показали, что коэффициент открытой пористости составляет 4–7 %, а абсолютной газовой проницаемости – 0,01–2 мД (наибольшее количество образцов имеет $K_{пр} = 0,01$ мД). Проведенный анализ результатов микропетрографического изучения керна материала показал, что скелет пород московского яруса занимает в среднем 70 % объема и представлен на 41–47 % кварцем, на 3–10,5 % полевым шпатом и на 2,1–6 % слюдястыми минералами. Цемент состоит в основном из иллитовой глинистой составляющей (14–17,5 %) с содержанием кальцита (3–8,75 %). По данным геофизических исследований скважин были определены в ходе интерпретации подсчетные параметры, а именно: коэффициенты глинистости, открытой пористости и газонасыщения, которые позволили выделить в разрезе скважины № 10 Святогорская интервалы пород-коллекторов: 3836,4–3866,6 м и 4107,6–4140,4 м. Коэффициент открытой пористости перспективных пластов колеблется в пределах 4,5–9,5 %, а коэффициент газонасыщения – 50–65 %. По результатам испытания скважины № 10 (до интенсификации) в интервале 4042–4150 м получен приток газа дебитом 19,0 тыс. м³/с. Анализ полученных результатов, при сравнении с мировыми нефтегазовыми практиками в области нетрадиционных источников углеводородов, говорит о том, что изученные породы московского яруса Святогорской площади относятся к перспективным уплотненным породам-коллекторам.

Ключевые слова: газ уплотненных пород-коллекторов, нетрадиционные источники углеводородов, коэффициент пористости, коэффициент проницаемости.

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 553.3/4

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.13>

У. Керимли, д-р филос. (Науки о Земле), доц.,

E-mail: ulkerkerimli76@mail.ru,

Бакинский государственный университет,

ул. 3. Халилова, 23, г. Баку, Az 1148, Азербайджан;

**СТАДИИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ И ФАКТОРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ АГЮРТСКОГО
ЗОЛОТО-МЕДНО-МОЛИБДЕНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(МАЛЫЙ КАВКАЗ, АЗЕРБАЙДЖАН)**

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

Рассматриваются стадии минерализации Агюртского золото-медно-молибденового месторождения Малого Кавказа. На месторождении установлены следующие стадии минерализации: 1) кварц-молибденитовая; 2) кварц-пирит-халькопиритовая с золотом; 3) кварц-карбонат-сфалеритовая; 4) кварц-карбонатная. Золоторудные тела в основном сложены агрегатами второй стадии минерализации, которая является продуктивной. Минеральное вещество ее представлено тремя парагенетическими ассоциациями: 1) кварц-пиритовой; 2) кальцит-халькопирит-марказитовой; 3) золото-теллуридно-висмутитовой. Приведены химические анализы пиритов, висмута, теллуридов висмута. Выяснено, что самородное золото встречается в виде мелких, простой формы золотинок в зернах раннего пирита. В прожилках халькопирита и зернах пирита оно обычно приурочено к краевым частям. Наибольшее количество золота находится в тесном сростании с теллуридо-висмутитовыми минералами. Выяснено, что среда рудоотложения (минеральный состав, химизм и структурно-текстурные особенности вмещающих пород) играла решающую роль для различных типов оруденения. Установлено, что в плане Агюртское месторождение локализуется в контуре блока пород, вытянутого в северо-западном (субмеридиональном) направлении, ограниченного с север-северо-запада и северо-востока тектоническими зонами, которые также несут на себе определенный отпечаток формирования структурного плана рудного поля с близширотным простиранием тектонических элементов. Эти структуры, наиболее тектонически подготовленные для локализации золото-медно-молибденового оруденения (подновлены в предрудные этапы и наиболее проницаемы для гидротерм), являлись главными рудопоглощающими и рудофокусирующими структурными элементами. Рудные зоны, представленные гидротермально-метасоматическими образованиями, а также пронизывающими их кварцевыми жилами и многочисленными прожилками и местами оруденелыми дайками, контролируются Главным Ордубадским продольным ($280^\circ \pm 70^\circ - 80^\circ \text{СВ}$) и Агюрт-Мисдагским поперечным ($40^\circ - 50^\circ \pm 70^\circ \text{СВ}$) разрывными нарушениями и примыкают к висячему боку (северо-восточному флангу) первого. Совокупность структурных и петрогенетических факторов не только предопределяла образование месторождений Агюртского типа, но и обуславливала горизонтальную и вертикальную зональность оруденения: устанавливается увеличение содержания Mo и уменьшение Cu с глубиной. Такая же закономерность наблюдается в горизонтальном направлении: по мере удаления от интрузивного массива и рудовыводящего канала, наблюдается переход от Cu-Mo оруденения к медному и далее полиметаллическому, т. е. увеличивается роль Cu , затем Pb и Zn . Горизонтальная зональность на Агюрте выражается в повышении содержания Au и общего количества сульфидов по мере удаления от Главного Ордубадского разлома, а вертикальная в повышении содержания Au и уменьшении Ag с глубиной.

Ключевые слова: Агюртское золото-медно-молибденовое месторождение, Малый Кавказ, стадии минерализации, факторы локализации.

Введение. Изученность эндогенного благороднометалльного оруденения в Мисхано-Зангезурской зоне крайне низкая, хотя здесь известен целый ряд месторождений и проявлений золота и золотосодержащих руд. Обладая достаточным ресурсным потенциалом золота, научно-практическое обоснование создания минерально-сырьевой базы благородного металла в Азербайджанской республике о-прежнему остается актуальным. Решение этой проблемы требует проведения научно-исследовательских работ, направленных на изучение условий формирования и закономерностей размещения всех известных типов золотого оруденения. Изучение всех факторов благороднометалльного оруденения и выработка на этой основе надежных критериев для поисков и прогнозной оценки золотосодержащих юго-западной эндо- и экзоконтактовой полосы Мегри-Ордубадского батолита имеет теоретическое и практическое значение. В связи с этим целью настоящей статьи является выявление стадий минерализации, минерального состава и золотосодержащих минеральных ассоциаций, на примере Агюртского золото-медно-молибденового месторождения.

Методы исследования. Основу представленной публикации составляют минералогические, лазерные микроспектральные анализы рудных минералов Агюртского месторождения. Микрозондовые определения состава минералов выполнены рентгеновским микроанализатором MS-46 "Самека" (Франция) в ИГЕМ РАН и ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург).

Геологическое строение Ордубадского рудного района. Ордубадский рудный район еще с дореволуционного времени является предметом повышенного интереса геологов: здесь проходит юго-западный контакт крупнейшего на Малом Кавказе Мегри-Ордубадского батолита с вулканогенным и вулканогенно-осадочным комплексом эоценового возраста (Азизбеков, 1961; Азизбеков и др., 1964).

Большинство исследователей сходятся во мнении о безусловной перспективности Ордубадского рудного района. Предпосылкой к такому утверждению является наличие здесь мощной (до 2 км ширины) полосы гидротермально измененных пород, сопровождающих серию разломов глубинного заложения, а также наличие многочисленных проявлений золотой, медной, молибденовой и полиметаллической минерализации (Баба-заде и др., 2003; Баба-заде и Керимли, 2013; Керимли, 2011, 2012).

Доказательством перспективности рудного района является наличие в контуре исследуемой области Парагачайского горнорудного предприятия, долгие годы эксплуатирующего руды одноименного медно-молибденового и Агдаринского колчеданно-полиметаллического месторождений, а также разведываемых ныне Агюртского, Мунундаринского, Пяззбашинского золоторудных и золотосодержащих месторождений (Баба-заде и др., 2003; Минерально-сырьевые ресурсы..., 2005).

В пределах эндо- и экзоконтактовой зоны проявления золотосодержащих преимущественно связаны с палеогеновым вулканоплутоническим комплексом. Мисхано-Зангезурская зона характеризуется: 1) широким развитием

золотосодержащей медно-молибденовой и порфировой медной минерализации, типичных для этой зоны и образующих на отдельных благоприятных участках промышленные концентрации (Парагачай, Мунундара, Агюрт и др.); 2) перспективными золото-сульфидно-кварцевыми месторождениями жильного типа, залегающими в экзоконтактной полосе батолита в вулканогенных образованиях эоцена (Пъязбаши, Шакардара и др.); 3) отсутствием в целом колчеданного оруденения, очень характерного для соседней, расположенной к востоку, Аразской структурно-металлогенической зоны; 4) развитием полиметаллической минерализации, которая главным образом имеет подчиненное развитие и обычно накладывается на медно-молибденовую или развивается на флангах таких месторождений. В отношении полиметаллического оруденения особое место в зоне занимает Учурдагский рудный узел, где известны самостоятельные перспективные месторождения (Учурдаг и др.) (Керимли, 2012).

В рамках Мисхано-Зангезурской зоны месторождения охватывает две группы: эндоконтактной полосы Мегри-Ордубадского батолита (золото-кварц-медно-молибденовая, золото-сульфидно-кварцевая, золото-сульфидно-апоскарновая) и экзоконтактной полосы батолита (золото-сульфидно-кварцевая, золото-сульфидная, золото-кварц-полиметаллическая, формация золотоносных метасоматитов) (Баба-заде и др., 2000; Баба-заде и Керимли, 2013; Керимли, 2014).

Группа месторождений эндоконтактной полосы. Это – типичные месторождения средних глубин с сопутствующими меди и молибдену (иногда в промышленных количествах) золотом, мышьяком и висмутом, относимые по возрасту к раннеколлизийному этапу ($P_3 - N_2^2$) альпийского металлогенического цикла (Рустамов, 2005). Большинство месторождений этой группы пространственно ассоциирует с близкими к ним по возрасту гипабиссальными телами и дайковыми образованиями послеврхнеэоцен–олигоценового комплекса малых интрузий, с которыми оруденение данного типа, по установившемуся мнению, имеет парагенетическую связь.

Одной из характерных минералогических особенностей месторождений описываемой группы, позволяющей отнести их к кварц-золото-медно-молибденовой формации, является более или менее постоянное присутствие в них меди и молибдена, участвующих, как правило, в составе ранних минеральных ассоциаций.

Собственная золотая минерализация, связанная с более поздними стадиями минералообразования, выделяется в качестве продуктивной ассоциации.

Наиболее представительными месторождениями эндоконтактной полосы являются Агюртское и Мунундаринское.

Группа месторождений экзоконтактной полосы. Эта группа золоторудных месторождений представлена средне-низкотемпературными месторождениями, формировавшимися в условиях средних-малых глубин (присутствие халцедоновидного кварца и др.). Промышленные представители этой группы – жильные тела и золотоносные метасоматиты Пъязбашинского рудного поля (Пъязбаши, Шакардара).

Этот наиболее перспективный тип оруденения представлен формацией золото-сульфидно-кварцевых месторождений, относимой группой исследователей, изучавших Пъязбашинское рудное поле (Баба-заде и др., 1990; Керимли, 2014; Рамазанов, 1992) к характерному типу оруденения экзополосы, выдерживающегося на весьма обширной площади.

Агюртское золото-медно-молибденовое месторождение. Агюртское золото-медно-молибденовое месторождение расположено в центральной части Мисдаг-

Шелалинского рудного узла в среднем течении р. Айчангылчай, правого притока р. Ванандчай, в 8 км к северо-востоку от с. Пазмара, на абсолютных отметках 2300–2800 м.

Месторождение приурочено к эндоконтактной зоне Мегри-Ордубадского сложного полифазного и полифазциального батолита и располагается в блоке пород, ограниченном протяженными субширотными разрывными нарушениями, и контролируется узлом их пересечения с разломами субмеридионального простирания (рис. 1). В геологическом строении месторождения принимают участие поздние эоцен-нижнемиоценовые интрузивные комплексы Мегри-Ордубадского сложного, полифазного и полифазциального батолита. Они состоят в основном из интрузивных пород ранней – адамеллитовой и поздней – граносиенитовой фаз внедрения плутона (Баба-заде и др., 1990; Керимли, 2014; Рустамов, 2005; Mortiz et al., 2016).

Тектоническое строение района осложнено многочисленными разрывными нарушениями низшего порядка. Развита она как в теле батолита, так и во вмещающих породах, в особенности вблизи его контакта.

Для локализации оруденения и его размещения существенную роль играет внутренняя структура интрузивных массивов. Возрастные особенности разрывных нарушений устанавливаются по их взаимоотношениям (пересечениям). К этому типу относится ряд крупных разрывных структур, особенно Главный Ордубадский разлом, который является наиболее четким проявлением глубинного заложения, контролировавшего внедрение Мегри-Ордубадского батолита (Рамазанов и Керимли, 2012). Северо-восточные близширотные разломы определяют контуры Агюртского рудного поля развития интрузивных пород различных фаз, выполняя, таким образом, роль крупных магмоподводящих каналов в палеоген-неогеновое время.

В плане месторождение локализуется в контуре блока пород, вытянутого в северо-западном (субмеридиональном) направлении, ограниченного с север-северо-запада и северо-востока тектоническими зонами, которые также несут на себе определенный отпечаток формирования структурного плана рудного поля с близширотным простиранием тектонических элементов. Именно эти структуры наиболее тектонически подготовленные для локализации золото-медно-молибденового оруденения (подновлены в предрудные этапы и наиболее проницаемы для гидротерм), являлись главным рудоуплотняющим и рудолокализирующим структурными элементами. Рудные зоны, представленные гидротермально-метасоматическими образованиями, а также пронизывающими их кварцевыми жилами и многочисленными прожилками и местами оруденелыми дайками, контролируются Главным Ордубадским продольным ($280^\circ \angle 70-80^\circ \text{CB}$) и Агюрт-Мисдагским поперечным ($40-50^\circ \angle 70^\circ \text{CB}$) разрывными нарушениями, и примыкают к висячему боку (северо-восточному флангу) первого. Главный Ордубадский разлом по существу представляет собой главную рудоконтролирующую структуру, определяющую позицию не только Агюртского, но и Пъязбашинского, Шакардаринского, Мисдагского и др. месторождений. Оруденение на месторождении относится к типу комплексной медно-молибдено-золото-кварц-сульфидной формации. Золоторудные тела в большинстве случаев пространственно разобщены от медно-молибденовых руд.

На месторождении устанавливаются следующие стадии минерализации: 1) кварц-молибденитовая; 2) кварц-пирит-халькопиритовая с золотом; 3) кварц-карбонат-сфалеритовая; 4) кварц-карбонатная. В соответствии с указанной последовательностью минерализации сформировался ряд в той или иной степени обособленных типовых руд.

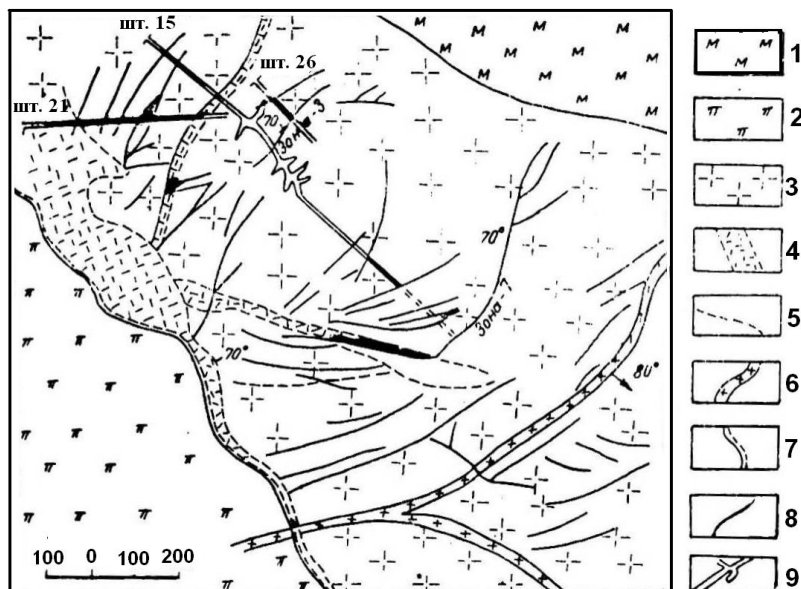


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Агюртского золото-медно-молибденового месторождения:

- 1 – породы монцитового интрузива; 2 – породы адамеллитового интрузива; 3 – породы граносиенитового интрузива; 4 – гидротермально-измененные породы; 5 – границы фаций; 6 – дайки гранодиорит-порфиров, авгит-диоритов, лампрофиров; 7 – Главный Ордубадский разлом; 8 – золото-медно-молибденовые жилы и жильные зоны; 9 – штольни

Золоторудные тела в основном сложены агрегатами второй стадии минерализации, которая является продуктивной. Минеральное вещество ее представлено тремя парагенетическими ассоциациями: 1) кварц-пиритовой; 2) кальцит-халькопирит-марказитовой; 3) золото-теллуридно-висмутовой.

Кварц-пиритовая ассоциация составляет практически до 90 % рудной массы, из которых на долю серного кол-

чедана приходится в среднем 30–35 %. Пирит представлен крупнокристаллическим (0,05–1,5 мм) массивным и густокрапленным агрегатом метасоматического облика, интенсивно трещиноватым в общей массе и микробрекчированным в краевой части. Содержит реликты кварца. В пробах пирита химическими анализами на рентгеновском микроанализаторе MS-46 "Самека" определены Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As и S (табл. 1).

Таблица 1

Результаты химических анализов пиритов Агюртского месторождения

Место взятия	Номер образца	Номер анализа	Fe		Co		Ni		Cu		Zn		As		S		Сумма	Формула
			вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.		
Шт. №26, зона 3, штр. 1	2055	1	46,2	0,827	0,7	0,01	0,07	0,01	–	–	–	–	–	–	53,5	1,668	100,47	$(\text{Fe}_{0,99}\text{Co}_{0,01}\text{Ni}_{0,01})_{1,001}\text{S}_{2,00}$
		2	46,4	0,831	0,03	0,005	0,07	0,01	–	–	–	–	–	–	53,5	1,668	100,0	$(\text{Fe}_{0,996}\text{Ni}_{0,001}\text{Co}_{0,001})_{0,998}\text{S}_{2,00}$
Шт. №15, зона 3, штр. 2	2412	1	46,6	0,834	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	53,4	1,668	100,0	$\text{Fe}_{1,00}\text{S}_{2,00}$
		2	46,7	0,836	–	–	–	–	0,15	0,02	0,05	0,008	0,06	0,004	53,85	1,679	100,81	$(\text{Fe}_{0,935}\text{Zn}_{0,001}\text{Cu}_{0,003})_{0,989}(\text{As}_{0,001}\text{S}_{1,99})_{1,991}$

Кальцит-халькопирит-марказитовая ассоциация развивается в интерстициях между зернами пирита предыдущей ассоциации и в виде прожилков рассекает ее массивный агрегат. В составе этой ассоциации наблюдаются карбонат, халькопирит, мельниковит-пирит, марказит, мелкозернистый пирит – как главные минералы и сфалерит, галенит – в качестве редких.

Халькопирит является одним из основных промышленно ценных минералов этой ассоциации, распространен почти во всех рудных стадиях. Мельниковит-пирит представлен типичный для золоторудного месторождения разновидностью – кристаллами и зернами пористой структуры, погруженными в карбонат.

Марказит находится в тесном срастании с халькопиритом, образуя в нем агрегат колломорфной структуры. Мелкозернистый пирит, образующийся, вероятно, в результате коррозии и переотложения раннего пирита, в виде мелких кубических кристалликов свежего облика нарастает на обломки кварца ранней кварц-пиритовой

ассоциации и развивается по халькопириту. Пирротин встречается в виде мелких округлых и овальных идиоморфных зерен размером до 0,1 мм, червеобразных – до 0,1х0,25 мм, ксеноморфных округлых и овальных форм выделений – до 0,1х0,3 мм. Молибденит образует отдельные расщепленные листочки в карбонатных прожилках и иногда в кварце, часто встречается в ассоциации с халькопиритом в кварцевой основной массе и в интерстициях между обломками зерен пирита и халькопирита. Размер отдельных зерен молибденита колеблется от 0,001 до 0,1 мм и не превышает 0,2 мм.

Химический состав молибденита изучен на рентгеновском микроанализаторе MS-46 "Самека". Определение Mo и Re выполнялось по излучению $L\alpha$, а, Fe, Cu и S по Ka.

Арсенопирит отмечается в парагенезисе с пиритом, халькопиритом, сфалеритом, марказитом и пирротин в кварцевой основной массе, а также в парагенезисе с висмутином, самородным висмутом, теллуrowисмутином в массе пирита в виде ромбических зерен размером

до 0,1 мм и тонких прожилков от 0,2 до 1,0-1,5 мм. Магнетит в сростании с гипогенным гематитом постоянно присутствует в рудах в различных количествах и в разных взаимоотношениях с главными минералами.

Золото-теллуридно-висмутовая ассоциация отмечается в тесной пространственной связи с халькопиритом предыдущей ассоциации. Прожилки золота и теллуридов, также как и халькопирит, выполняют поры в раннем пирите. В состав ассоциации входят теллуридо-висмутит, самородный висмут, висмутин, тетрадимит, эмплектит, матильдит, гессит и самородное золото; размеры сростаний 0,011 м. Главные рудные минералы вышеописанных ассоциаций были подвергнуты локальному лазерному анализу с целью выявления их золотоносности (табл. 2, 3). В составе кварц-пиритовой ассоциации макроскопически золото не установлено, но по данным анализов содержание его в пирите составляет 0,005–0,05 %, марказите – 0,003–0,05 %. В халькопирите кальцит-халькопирит-марказитовой ассоциации золото не установлено, теллур в составе примесей

также не наблюдается, а висмут отмечен в пирите, марказите и халькопирите обеих стадий. Вслед за тем, как золото и теллур исчезают из числа примесей в составе халькопирита, появляется собственная ассоциация этих минералов (третья парагенетическая ассоциация), в которой сначала образуются соединения висмута и теллура, а затем выделяется самородное золото.

Самородное золото отмечается в виде мелких, простой формы золотинок в зернах раннего пирита. В прожилках халькопирита и зернах пирита оно обычно приурочено к краевым частям. Наибольшее количество золота находится в тесном сростании с теллуридо-висмутовыми минералами. При рассмотрении состава элементов – примесей в главных минералах (табл. 4) крупнокристаллический ранний пирит отличается от марказита; пористый пирит, заключая множество мельчайших реликтов вмещающей среды (хлорит, карбонат), содержит примеси меди и магния.

Таблица 2

Результаты химических анализов самородного висмута и висмутита Агюртского месторождения

Результаты химических анализов самородного висмута и висмутитна Агурского месторождения							
Номер образца	Номер анализа	Содержание				Сумма	Формула
		Bi		S			
		вес. %	ат. кол.	вес. %	ат. кол.		
2401	1	100,0	0,477	0,05	0,002	100,05	Bi
2412	2	100,0	0,477	0,03	0,001	100,03	Bi
2401	3	81,2	0,388	18,3	0,578	99,5	Bi _{2,01} S _{3,00}
	4	81,4	0,389	18,5	0,579	99,9	Bi _{2,02} S _{3,00}
2412	5	81,7	0,389	18,3	0,578	100,0	Bi _{2,02} S _{3,00}

Таблица 3

Результаты химических анализов теллуридо-висмутита Агюртского месторождения

Номер образца	Номер анализа	Содержание, %						Сумма	Формула
		Bi		Te		As			
		вес.%	ат.кол.	вес.%	ат.кол.	вес.%	ат.кол.		
2412	1	53,2	0,255	46,8	0,374	–	–	100,01	Bi _{2,00} Te _{3,00}
	2	53,4	0,255	46,6	0,374	–	–	100,00	Bi _{2,00} Te _{3,00}
	3	53,1	0,255	46,9	0,375	–	–	100,00	Bi _{2,00} Te _{3,00}
	4	53,2	0,255	46,9	0,375	–	–	100,01	Bi _{2,00} Te _{3,00}
	5	53,0	0,255	47,1	0,376	–	–	100,1	Bi _{2,00} Te _{3,00}
2401	6	53,1	0,255	46,7	0,374	0,02	0,0002	99,82	Bi _{2,00} (Te _{2,999} As _{0,001}) _{3,00}
	7	53,0	0,255	46,8	0,374	0,03	0,0002	99,83	Bi _{2,00} (Te _{2,999} As _{0,001}) _{3,00}
	8	52,9	0,254	46,9	0,375	0,02	0,0002	99,82	Bi _{2,00} (Te _{2,999} As _{0,001}) _{3,00}

Таблица 4

Содержание элементов – примесей в главных рудных минералах Агюртского месторождения (по данным лазерного локального микроспектрального анализа)

Ассоциация	Минералы	Ag	Te	Au	Bi
Кварц-пиритовая	массивный пирит	0,001-0,003	0,05-0,1	0,005-0,05	0,005-0,01
		10	10	10	10
		ср. 0,0016	ср. 0,0113	ср. 0,00195	ср. 0,00185
Кальцит-халькопирит-марказитовая	мельниквит-пирит	0,003	0,05	–	0,01
	марказит	0,003-0,005	0,1	0,003-0,05	0,005-0,05
		4	4	4	4
		ср. 0,0035	ср. 0,0025	ср. 0,0157	ср. 0,015
	халькопирит	–	–	–	0,005-0,01
	мелькозернистый пирит	0,003	–	0,01	–
		10			

В числителе дроби показан интервал значений содержания элемента в минерале, в знаменателе – количество определений.

В халькопирите продуктивной ассоциации отсутствуют золото и серебро.

Между тем во всех разновидностях пирита постоянно отмечается примесь золота до сотых долей процента. По результатам анализов становится ясно, что золото в течение длительного времени образует примесь в сульфидах; оно присутствует в первой и второй стадиях, а теллур только в первой, что соответствует наблюдающимся и микроскопическим их взаимоотношениям. Видимое золото является наложенным по

отношению ко всем минералам, в том числе и теллуридам. Аналогичная ситуация распределения золота наблюдается и в других известных месторождениях (Волков и др., 2010, Сафонов, 2000, 2003, 2010).

Таким образом, среда рудоотложения (минеральный состав, химизм и структурно-текстурные особенности вмещающих пород) играла решающую роль для различных типов оруденения. Совокупность структурных и петрогенетических факторов не только предопределяла

образование месторождений Агюртского типа, но и обуславливала *горизонтальную и вертикальную зональность* оруденения: устанавливается увеличение содержания Мо и уменьшение Си с глубиной. Такая же закономерность наблюдается в горизонтальном направлении: по мере удаления от интрузивного массива и рудовыводящего канала, наблюдается переход от Си-Мо оруденения к медному и далее полиметаллическому, т. е. увеличивается роль Си, затем Pb и Zn. Горизонтальная зональность на Агюрте выражается в повышении содержания Au и общего количества сульфидов по мере удаления от Главного Ордубадского разлома, а вертикальная в повышении содержания Au и уменьшении Ag с глубиной. Судя по гипсометрии выходов золотосодержащих кварцево-рудных жил на современном эрозионном срезе и на смежных площадях, вертикальный размах благороднометалльной минерализации на Агюртском месторождении составляет 600 м и выше, а разница абсолютных отметок выходов жильных тел на дневную поверхность – более 200–300 м.

Список использованных источников

- Азизбеков, Ш.А. (1961). Геология Нахичиванской АССР. М.: Госуд. научно-техн. изд-во.
- Азизбеков, Ш.А., Гаджиев, Т.Г., Емельянова, Е.Н., Рустамов, М.И. (1964). Петрология интрузивов Араксинской тектонической зоны Малого Кавказа. Баку: Изд. АН Азерб. ССР.
- Баба-заде, В.М., Абдуллаева, Ш.Ф., Кекелия, С.А., Кекелия, М.А. (2012). Золотосодержащие вулканогенное месторождение цветных металлов Малого Кавказа и Восточных Понтид и их генезис. *Вестник Бакинского Университета. Серия естественных наук*, 1, 55–90.
- Баба-заде, В.М., Керимли, У.И. (2013). Эндогенная металлогения и прогноз благороднометалльного оруденения Юга Малого Кавказа. Баку: изд-во Бакинского университета.
- Баба-заде, В.М., Махмудов, А.И., Рамазанов, В.Г. (1990). Медно- и молибден-порфиновые месторождения. Баку: Азернешр.
- Баба-заде, В.М., Мусаев, Ш.Д., Насибов, Т.Н., Рамазанов, В.Г. (2003). Золото Азербайджана. Баку: Азербайджан Милли Энциклопедиясы.
- Баба-заде, В.М., Насибов, Т.Н., Рамазанов, В.Г., Гусейнова, Дж.М. (2000). Золоторудные месторождения Араксинской металлогенической зоны юга Малого Кавказа. *Вестник Бакинского университета. Серия естественных наук*, 2, 104–131.
- Волков, А.В., Злобина, Т.М., Лаломов, А.В. (2010). Самородное золото: типоморфизм минеральных ассоциаций, условия образования месторождений, задачи прикладных исследований. *Геология рудных месторождений*, 52 (6), 572–578.
- Геология Азербайджана. (2006). Т. V. Полезные ископаемые. Баку: "Nafta-Press".
- Керимли, У.И. (2011). Особенности геологического строения и характер изменения окорудных пород Агюртского золото-медно-молибденового месторождения (Мискхан-Зангезурская зона, Малый Кавказ). *Вестник Бакинского университета. Серия естественных наук*, 4, 153–164.
- Керимли, У.И. (2012). Пространственная и генетическая сопряженность благороднометалльного, медно-полиметаллического, медно-молибденового и медно-порфинового оруденения Мискхан-Зангезурской зоны. *Вестник Бакинского Университета. Серия естественных наук*, 4, 75–82.
- Керимли, У.И. (2012). Структура Агюртского месторождения и структурный контроль золото-медно-молибденового оруденения (Мискхан-Зангезурская зона, Малый Кавказ). *Вестник Бакинского университета. Серия естественных наук*, 1, 110–134.
- Керимли, У.И. (2014). Эндогенная минерация и прогноз благороднометалльного оруденения коллизионного этапа развития Мискхан-Зангезурской зоны (юго-западная контактовая полоса Мегри-Ордубадского гранитоидного интрузива). *Автореф. дис. ... докт. филос. Науки о Земле: 2520.01*. Баку.
- Минерально-сырьевые ресурсы Азербайджана. (2005). Гл. ред. В.М. Баба-заде. Баку: Изд-во "Озан".
- Рамазанов, В.Г. (1992). Медно-порфиновая формация Азербайджана. *Автореф. дис. ... докт. геол.-минералог. наук*. Тбилиси.
- Рамазанов, В.Г., Керимли, У.И. (2012). Формирование золото-кварц-сульфидных жил Пьязбашинского месторождения и некоторые закономерности их размещения. *Вестник Бакинского университета. Серия естественных наук*, 2, 124–144.
- Рустамов, М.И. (2005). Южно-Каспийский бассейн-геодинамические события и процессы. Баку: Нафта-Пресс.
- Сафонов, Ю.Г. (2000). Глубины формирования и размещения золоторудных месторождений. *Отечественная геология*, 4, 20–27.
- Сафонов, Ю.Г. (2003). Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенический потенциал. *Геология рудных месторождений*, 45 (4), 305–320.
- Сафонов, Ю.Г. (2010). Актуальные вопросы теории образования золоторудных месторождений. *Геология рудных месторождений*, 52 (6), 487–511.
- Moritz, R., Rezeau, H., Ovtcharova, M. et al. (2016). Long-lived, stationary magmatism and pulsed porphyry systems during Tethyan subduction to post-collision evolution in the southernmost Lesser Caucasus, Armenia and Nakhichevan. *Gondwana Research*, 37, 465–503.

References

- Azizbekov, Sh.A. (1961). Geology of the Nakhchivan Autonomous Soviet Socialist Republic. M.: State. scientific and technical publishing house. [in Russian]
- Azizbekov, Sh.A., Gadzhiev, T.G., Emelyanova, E.N., Rustamov, M.I. (1964). Petrology of the intrusives of the Araksian tectonic zone of the Lesser Caucasus. Baku: Ed. AN Azerb. SSR. [in Russian]
- Baba-zade, V.M., Abdullaeva, Sh.F., Kekelia, S.A., Kekelia, M.A. (2012). Gold-containing volcanogenic deposit of non-ferrous metals of the Lesser Caucasus and East Pontids and their genesis. *Bulletin of Baku University. Series of Natural Sciences*, 1, 55–90. [in Russian]
- Baba-zade, V.M., Karimli, U.I. (2013). Endogenous metallogeny and the forecast of noble metal mineralization in the South of the Lesser Caucasus. Baku: Baku University Press. [in Russian]
- Baba-zade, V.M., Makhmudov, A.I., Ramazanov, V.G. (1990). Copper and molybdenum-porphry deposits. Baku: Azerneshr. [in Russian]
- Baba-zade, V.M., Musaev, Sh.D., Nasibov, T.N., Ramazanov, V.G. (2003). Gold of Azerbaijan. Baku: Azerbaijan Milli Encyclopedias. [in Russian]
- Baba-zade, V.M., Nasibov, T.N., Ramazanov, V.G., Huseynova, J.M. (2000). Gold deposits of the Araksian metallogenic zone in the south of the Lesser Caucasus. *Bulletin of Baku University. Series of Natural Sciences*, 2, 104–131. [in Russian]
- Geology of Azerbaijan. (2006). Vol. V. Minerals. Baku: Nafta-Press. [in Russian]
- Karimli, U.I. (2011). Peculiarities of the geological structure and the nature of the changes in the ore-bearing rocks of the Agyurt gold-copper-molybdenum deposit (Miskhan-Zangezur zone, Lesser Caucasus). *Bulletin of Baku University. Series of Natural Sciences*, 4, 153–164. [in Russian]
- Karimli, U.I. (2012). Spatial and genetic conjugation of noble metal, copper-polymetallic, copper-molybdenum and copper-porphry mineralization of the Miskhan-Zangezur zone. *Bulletin of Baku University. Series of Natural Sciences*, 4, 75–82. [in Russian]
- Karimli, U.I. (2012). The structure of the Agyurt deposit and the structural control of gold-copper-molybdenum mineralization (Miskhan-Zangezur zone, Lesser Caucasus). *Bulletin of Baku University. Series of Natural Sciences*, 1, 110–134. [in Russian]
- Karimli, U.I. (2014). Endogenous Minerageny and the Forecast of Noble Metals of the Collisional Stage of Development of the Miskhan-Zangezur Zone (South-West Contact Strip of the Meghri-Ordubad Granitoid Intrusion). *Extended abstract ... Doctor Philosophy's thesis (Earth Sciences): 2520.01*. Baku. [in Russian]
- Mineral resources of Azerbaijan. (2005). Ch. Ed. V.M. Baba-zade. Baku: Ozan Publishing House. [in Russian]
- Moritz, R., Rezeau, H., Ovtcharova, M. et al., (2016). Long-lived, stationary magmatism and pulsed porphyry systems during Tethyan subduction to post-collision evolution in the southernmost Lesser Caucasus, Armenia and Nakhichevan. *Gondwana Research*, 37, 465–503.
- Ramazanov, V.G. (1992). Copper-porphry formation of Azerbaijan. *Extended abstract ... Doctor's thesis (Geol.-Min. Sciences)*. Tbilisi. [in Russian]
- Ramazanov, V.G., Kerimli, U.I. (2012). The formation of gold-quartz-sulfide veins of the Pyazbashinskoye deposit and some patterns of their distribution. *Bulletin of Baku University. Series of Natural Sciences*, 2, 124–144. [in Russian]
- Rustamov, M.I. (2005). South Caspian basin-geodynamic events and processes. Baku: Nafta Press. [in Russian]
- Safonov, Yu.G. (2000). Depths of formation and placement of gold deposits. *Russian Geology*, 4, 20–27. [in Russian]
- Safonov, Yu.G. (2003). Gold and gold deposits of the world - the genesis and metallogenic potential. *Geology of ore deposits*, 45 (4), 305–320. [in Russian]
- Safonov, Yu.G. (2010). Actual problems of the theory of the formation of gold deposits. *Geology of ore deposits*, 52 (6), 487–511. [in Russian]
- Volkov, A.V., Zlobina, T.M., Lalomov, A.V. (2010). Native gold: typomorphism of mineral associations, conditions for the formation of deposits, tasks of applied research. *Geology of Ore Deposits*, 52 (6), 572–578. [in Russian]

Надійшла до редколегії 30.10.19

U. Kerimli, PhD, Assoc. Prof.
E-mail: ulkerkerimli76@mail.ru,
Baku State University,
23 Z. Khalilov Str., Baku, AZ1148, Azerbaijan

STAGES OF MINERALIZATION AND LOCALIZATION FACTORS OF THE AGYURT GOLD-COPPER-MOLYBDENUM DEPOSIT (LESSER CAUCASUS, AZERBAIJAN)

The article considers the stages of mineralization of the Agyurt gold-copper-molybdenum deposit of the Lesser Caucasus. The following mineralization stages were established at the field: 1) quartz-molybdenum; 2) quartz-pyrite-chalcopryite with gold; 3) quartz-carbonate-sphalerite; 4) quartz-carbonate. Gold ore bodies are mainly composed of aggregates of the second stage of mineralization, which is productive. Its mineral substance is represented by three paragenetic associations: 1) quartz-pyrite; 2) calcite-chalcopryite-marcasite; 3) gold-telluride-bismuth. Chemical analyzes of pyrites, bismuthin, tellurium bismuthite are given. It has been found that native gold is found in the form of small, simple forms of gold in grains of early pyrite. In veins of chalcopryite and grains of pyrite, it is usually confined to the marginal parts. The largest amount of gold is in close intergrowth with tellurium-bismuth minerals. It was found that the ore deposition environment (mineral composition, chemistry and structural and texture features of the host rocks) played a decisive role for various types of mineralization. It is established that, in the plan, the Agyurt deposit is localized in the contour of a rock block elongated in the northwest (submeridional) direction, bounded by tectonic zones from the north-north-west and north-east, which also bear a certain imprint of the formation of the structural plan of the ore field with near latitudinal strike of tectonic elements. These structures are most tectonically prepared for the localization of gold-copper-molybdenum mineralization (updated in the pre-ore stages and most permeable for hydrothermal structures), and were the main ore-supplying and ore-locating structural elements. The ore zones represented by hydrothermal-metasomatic formations, as well as quartz veins piercing them and numerous veinlets and sometimes mineralized dykes, are controlled by the Main Ordubad longitudinal ($280^{\circ}\angle 70^{\circ}-80^{\circ}\text{NE}$) and Agyurt-Misdag transverse ($40^{\circ}-50^{\circ}\angle 70^{\circ}\text{NE}$) with discontinuous violations and adjoin the hanging side (northeast flank) of the first. The combination of structural and petrogenetic factors not only predetermined the formation of deposits of the Agyurt type, but also determined the horizontal and vertical zonation of mineralization: an increase in the Mo content and a decrease in Cu with depth are established. The same pattern is observed in the horizontal direction: as you move away from the intrusive massif and the ore-removing channel, there is a transition from Cu-Mo-mineralization to copper and then polymetallic, i.e. the role of Cu increases, then Pb and Zn. The horizontal zoning in Agyurt is expressed in an increase in Au content and the total amount of sulfides with distance from the Main Ordubad Fault, and vertical shows an increase in Au content and decreases in Ag with depth.

Keywords: Agyurt gold-copper-molybdenum deposit, Lesser Caucasus, stages of mineralization, localization factors.

У. Керімлі, д-р філос. (Науки про Землю), доц.
E-mail: ulkerkerimli76@mail.ru,
Бакинський державний університет,
вул. 3. Халілова, 23, м Баку, Аз 1148, Азербайджан;

СТАДІЇ МІНЕРАЛІЗАЦІЇ І ФАКТОРИ ЛОКАЛІЗАЦІЇ АГЮРТСЬКОГО ЗОЛОТО-МІДНО-МОЛІБДЕНОВОГО РОДОВИЩА (МАЛИЙ КАВКАЗ, АЗЕРБАЙДЖАН)

Розглянуто стадії мінералізації Агюртського золото-мідно-молібденового родовища Малою Кавказу. На родовищі встановлено такі стадії мінералізації: 1) кварц-молібденітова; 2) кварц-пірит-халькопіритува із золотом; 3) кварц-карбонат-сфалеритова; 4) кварц-карбонатна. Золоторудні тіла в основному складені агрегатами другої стадії мінералізації, яка є продуктивною. Мінеральна речовина її представлена трьома парагенетичними асоціаціями: 1) кварц-піритувою; 2) кальцит-халькопірит-марказитовою; 3) золото-телуридно-вісмутовою. Наведено хімічні аналізи піритів, вісмутина, телуровісмутита. З'ясовано, що самородне золото зустрічаються у вигляді дрібних, простої форми золотин у зернах раннього піриту. У прожилках халькопірита і зернах піриту воно зазвичай приурочено до крайових частин. Найбільша кількість золота перебуває у тісному зрощенні з телур-вісмутовими мінералами. З'ясовано, що середовище рудовідкладення (мінеральний склад, хімізм і структурно-текстурні особливості вмісних порід) відіграло вирішальну роль для різних типів зруденіння. Встановлено, що у плані Агюртське родовище локалізується у контурі блоку порід, витягнутого у північно-західному (субмеридіанальному) напрямку, обмеженого з північ-північного заходу і північного сходу тектонічними зонами, які також несуть на собі певний відбиток формування структурного плану рудного поля з близьким до широтного простяганням тектонічних елементів. Ці структури, найбільш тектонічно підготовлені для локалізації золото-мідно-молібденового зруденіння (підновлені у передрудні етапи і найбільш проникні для гідротерм), були головними структурними елементами рудопідведення і рудолокалізації. Рудні зони, представлені гідротермально-метасоматичними утвореннями, а також кварцовими жилами і численними прожилками, і місцями зруденілими дайками, контролюються Головним Ордубадським поздовжнім ($280^{\circ}\angle 70^{\circ}-80^{\circ}\text{СВ}$) і Агюрт-Місдагським поперечним ($40^{\circ}-50^{\circ}\angle 70^{\circ}\text{СВ}$) розривними порушеннями, і прилягають до висячого боку (північно-східного флангу) першого. Сукупність структурних і петрогенетичних факторів не тільки визначала появу родовищ Агюртського типу, а й зумовлювала горизонтальну і вертикальну зональність зруденіння: встановлено збільшення вмісту Мо і зменшення Си з глибиною. Така ж закономірність спостерігається у горизонтальному напрямку: в міру віддалення від інтрузивного масиву і рудовидного каналу, спостерігається перехід від Си-Мо-зруденіння до мідного і далі поліметалічного, тобто збільшується роль Си, потім Pb і Zn. Горизонтальна зональність на Агюрті виражається у підвищенні вмісту Au і загальної кількості сульфідів в міру віддалення від Головного Ордубадського розлому, а вертикальна – у підвищенні вмісту Au і зменшенні Ag з глибиною.

Ключові слова: Агюртське золото-мідно-молібденове родовище, Малий Кавказ, стадії мінералізації, фактори локалізації.

УДК 553.981:551.351.2 (262.5)
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.14>

О. Омельчук, канд. геол.-мінералог. наук, доц.,
E-mail: msstesha@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
О. Сокур, канд. геол. наук,
E-mail: bytit@ukr.net,
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна

ПРОЦЕСИ ГЛИБИННОЇ ДЕГАЗАЦІЇ ЗЕМЛІ ЯК ПРИЧИНА УТВОРЕННЯ ДОННИХ КАРБОНАТНИХ СПОРУД У ШЕЛЬФОВИХ ЗОНАХ ОКЕАНУ

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

Розглянуто донні карбонатні утворення північно-західної частини Чорного моря та західного шельфу Південно-Китайського моря. Фактичний матеріал для даних досліджень було отримано при проведенні підводних робіт у Чорному морі за допомогою підводної лабораторії "Бентос-300", у Південно-Китайському морі з використанням підводного апарату "Север-2".

У результаті проведених досліджень було виявлено виділення газів з донних відкладів, зокрема з карбонатних споруд на глибинах 160–300 м. Ландшафтно-геологічна обстановка на морському дні досліджувалась за допомогою прямих спостережень полів газовиділень. В їх межах було встановлено, що газова компонента є тільки частиною флюїдного потоку, падає на рідку мінералізовану фазу, яка насичена розчинними сполуками. У морській воді, що характеризується іншими гідрохімічними параметрами, відбувається процес біохемогенного осадження, переважно карбонату кальцію з флюїдного потоку.

Визначено зв'язок типів споруд з глибиною моря та рельєфом дна. Найбільша кількість карбонатних утворень приурочена до вершинних ділянок гряд, на схилах споруди розріджені і кількість їх зменшується. На глибинах 160–190 м переважають покриті утворення монолітних, дуже міцних порід у вигляді масивних блоків завтовшки 40–60 см. Характер розподілу карбонату кальцію за розрізом кірок та плитчастих форм вказує на зв'язок флюїдного потоку з латеральним розподілом мінералізованих вод у придонному шарі вздовж поверхні осадового субстрату.

Порівняльні дані про речовинний склад карбонатних споруд Чорного та Південно-Китайського морів свідчать про те, що вони характеризуються загальними рисами глибинної вуглеводневої дегазациї, а також тектоно-геодинамічною подібністю районів їх поширення. Враховуючи те, що у межах в'єтнамського шельфу вже відкриті і розробляються великі родовища нафти і газу, перспективи відкриття аналогічних родовищ у північно-західній частині Чорного моря є досить обґрунтованими. Результати вивчення карбонатних утворень у Чорному морі можна використовувати для прогнозування і пошуку вуглеводневої сировини.

Ключові слова: глибинна дегазация Землі, карбонатні споруди, вуглеводнева сировина, шельфові зони океану.

Вступ. Під час робіт у Чорному морі (Поликарпов і др., 1989), при обстеженні мідієвих банок на південь від коси Тендра та о-ва Джарилгач підводною лабораторією "Бентос-300" на рівному дні, складеному алевритоглинистими карбонатними мулами, на глибині близько 22 м були виявлені конічні споруди (газові грифони) діаметром і висотою близько 0,5 м. З їх вершин візуально спостігалось виділення газу, імовірно метану. Температурна аномалія, виявлена при зондуванні поверхні дна з борту НДС "Професор Водяницький" у цьому районі, супроводжується збільшенням біомаси метанпереробної мікрофлори в поверхневому шарі осадків, що є однозначним підтвердженням присутності метану в таких газовиділеннях (Геворкян і др., 1990; Лялько і др., 1978).

Широкомасштабне виділення газів з донних відкладів було виявлено у північно-західній частині чорноморського шельфу під час експедиції НДС "Професор Водяницький" (Поликарпов і др., 1989). На ехограмах високочастотного ехолота вони проявлені у вигляді вертикальних "факелів" різної інтенсивності, часто переривчастих, що розсіюються у водній товщі не доходячи до поверхні.

Навіть попередня кількісна оцінка надходжень метану (і сірководню) у водну товщу показала, що вони повинні не тільки впливати на характер седиментаційних процесів, їх взаємодію з донним субстратом та геохімічний режим осадоногопичення, але й мати величезне значення для формування екологічної ситуації.

Прямі спостереження у межах полів газовиділень підтвердили їх переважно метановий склад (Шнюков і др., 2001). Однак встановлено (Геворкян і др., 1991), що газовий компонент є тільки частиною флюїдного потоку. Основна його складова припадає на рідку мінералізовану фазу, яка насичена розчинними сполуками. У морській воді, що характеризується іншими гідрохімічними параметрами, відбувається процес накладеного біохемогенного осадження з флюїдного потоку переважно

карбонату кальцію, що супроводжується карбонатизацією осадового покриву, утворенням на його поверхні кірок, монолітних і пустотілих плит та особливих структурних форм (газових грифонів), названих за формальною аналогією з "чорними курцями" рифтових зон "чорноморськими курцями" (Геворкян і др., 2005) (інші назви "білі" або "метанові курці").

Подібні утворення виявлені й в інших районах Світового океану – Північне море (Havland, 1984; Havland et al., 1987), шельф В'єтнаму (Сокур і Омельчук, 2019¹, 2019²). Принаймні в деяких випадках вони просторово асоціюють з родовищами вуглеводнів. Однак на теперішній час не виконано їх достатньо повне коректне порівняння і типізація, а також остаточно не встановлено зв'язок з процесами глибинної дегазациї, у т. ч. й у прогнозно-пошуковому аспекті.

Мета роботи полягає у встановленні відмін у речовинному складі "білих курців" північно-західної частини Чорного моря та аналогічних утворень В'єтнамського шельфу, які утворились у принципово інших геологічних умовах. При цьому важливим є оптимізація методики таких досліджень.

Методика досліджень. Інститутом геологічних наук НАН України разом з Інститутом біології південних морів НАН України і Базою спецфлоту та підводних апаратів "Гідронавт" була розроблена програма спільного вивчення цього явища. Поряд з традиційними методами досліджень – геологічними, океанографічними та біологічними, були використані підводні глибоководні населені апарати, насамперед підводна лабораторія "Бентос-300" (ПЛБ), з метою візуального обстеження полів газовиділень, отримання найбільш достовірної інформації про ситуацію на морському дні, цілеспрямованого відбору проб донних відкладів, води, газу. Вибір підводної лабораторії "Бентос-300" був зумовлений тим, що її устаткування дозволяло відбирати проби води з будь-

якого заданого горизонту та, за допомогою барокомплексу, виконувати водолазні роботи до глибини 250 м, а також проводити прецизійну батиметричну зйомку та ландшафтне картування. Безперервні підводні спостереження виконувались протягом 8–12 діб залежно від режиму роботи (буксирувальний або автономний).

Для відбору зразків в ПЛБ передбачено пристрій, що забезпечує вихід водолазів з лабораторії на глибинах до 200 м.

Коротка характеристика району досліджень. Виходячи з інтенсивності потоків газової компоненти флюїду, у **Чорному морі** для дослідження було обране поле газовиділень субмеридіонального простягання з координатами умовного центру 44°40'6" п. ш., 31°18'9" с. д. Поле газовиділень виходить далеко за межі обстеженої зони, що становить 3,7 милі по простяганню при ширині більше 1000 м (глибини 150–260 м). Морфологічно ця площа приурочена до східного борту Одеського каньйону, характеризується улоговинно-грядовим рельєфом, виположенням на глибинах до 200 м. Тут ширина балок і гряд варіює від сотень до тисяч метрів при перепаді висот до 30 м і кутами нахилу не більше 1°. Ближче до материкового схилу рельєф становиться більш контррастним, ширина гряд зменшується, крутість схилів досягає 12° при перепаді висот до 100 м, деякі гряди набувають східчасту терасовану будову. Ширина виположених горизонтальних терас не перевищує 100 м. Дно складене сірими із зеленуватим відтінком глинистими мулами, місцями перекритими великою кількістю білого органогенного детриту (бактеріальні мати). На поверхні осади відзначаються борозни – сліди скочування різних уламків, ямки, що інколи утворюють ямчасто-бугорчатий мікрорельєф. Зсувні явища виражаються в появі гофрованої поверхні осадового покриву.

Зразки карбонатних споруд були отримані також у межах **шельфової зони Південно-Китайського моря** за допомогою донного тралу та глибоководного підводного апарату.

Одержані результати та їх обговорення. На поверхні донного субстрату виявлялися хаотично розкидані численні уламки порід з максимальним розміром до 1–2 м. Відзначаються тонкі кіркоподібні покриви, що утворюють похилі козики, які нависають над осадами. Імовірно, первинною формою цих утворень була тонка, але міцна карбонатна кірка на поверхні мулів, що утворила козики у результаті розмиву підстильних осадищ придонними течіями, які досягають у даному районі швидкості до 1 м/с у штормовий період (Геворк'ян і др., 1991). Зустрічаються зовні масивні, однак пустотілі плитчасті форми, окремі вертикальні "труби" заввишки до 1,5 м і в діаметрі більше 20 см, аналогічні горизонтальні утворення завдовжки до 3 м, коритоподібні фрагменти трубчастих споруд. Плити і покриви часто закінчуються корало- і деревоподібними пустотілими спорудами. Зустрічаються сполучення округлих плитчастих форм, безформних наростів і деревоподібних споруд заввишки до 2 м. Ці утворення часто згруповані, відстань між такими спорудами та їхніми фрагментами становить іноді не більше 1 м (рис. 1, 2).

Простежується певний зв'язок типів споруд із глибиною та рельєфом дна. Найбільш щільно "забудовані" верхові ділянки гряд, на схилах споруди розріджені і кількість їх зменшується. На глибинах 160–190 м переважають покривні утворення монолітних, дуже міцних порід у вигляді тонких покривів або масивних блоків завтовшки 40–60 см, однак при роздавлюванні масивні блоки виявлялися пустотілими (рис. 1, а, б та 2, а, б). Зустрічаються фрагменти покривів і плит. Часто вони підмиті й утворюють гігантські гриби або нависаючі під кутом до поверхні дна навіси (рис. 1, в, д та 2, в, г). Деякі

з описаних утворень перекриті сучасними осадами і виявляються по нерівностях поверхні осади чорними плямами сульфідного зараження та скупченнями мікрофлори у вигляді білих бактеріальних матів, що обрамляють поховані споруди.

Поряд з газами "чорноморські курці" виносять і мінералізовану рідку фазу, склад якої, різні темпи надходження і субстратна специфічність донних відкладів, призводять до створення, у зоні геохімічного бар'єру вода-осад, різноманітних форм споруд.

Так, тонкі кіркоподібні утворення є результатом осадження карбонату кальцію при латеральній міграції рідкої фази флюїдів по поверхні осадового покриву. На поверхні осади формується дуже міцна мармуроподібна плівка. Проникаючи з поверхні в глиб осади, розчинена мінеральна речовина повністю перетворює вмісні алевро-глинисті і глинисті слабокарбонатні мули у глинисті вапняки або мергелі потужністю 5–10 см. Такі "кірки" лежать на новоевксинських і давньочорноморських в'язках, місцями напіврідкої консистенції, мулах з багатою фауною *Dreissena rostriformis disstinea*, не порушених процесом вторинної карбонатизації. Контакт із незмінними мулами нерівний і не завжди чіткий. Наявність фауни, що добре діагностується, дозволяє однозначно визначити віковий діапазон формування кірок в 20–25 тис. років. За радіовуглеводневими даними деревоподібної споруди, вік основи "курця" – 5100, а його верхньої частини – 3400 років (Іванов і др. 1991).

Характер розподілу карбонату кальцію по розрізу кірок та плитчастих форм вказує на зв'язок флюїдного потоку з латеральним розподілом мінералізованих вод у придонному шарі по поверхні осадового субстрату. Описана структура кірок свідчить, що мінералізація поверхневого шару мулів іде зверху донизу, що підтверджується характерною приуроченістю подібних форм тільки до поверхневих шарів осадового покриву. У той же час пряме випадіння в осад мінералізованої компоненти формує напливні утворення практично повністю складені з чистого карбонату.

Дерево-, коралоподібні і трубчасті споруди є газовидіними каналами "курців". Вони складені ніркоподібними агрегатами карбонатних пустотілих сферолітів розміром до 0,8 см. Тіло "курця" багате порами, наскрізними каналами, через які виходить газ. Колір "курців" білий, місцями з жовтуватим відтінком у результаті локального озалізнення слабкої інтенсивності. Внутрішні порожнини газовидіних каналів покриті тонкими чорними і сірими нальотами сульфідів заліза.

У місцях, де виділення характеризуються підвищеним дебітом, відбувається утворення трубчастих форм. Переривчастість процесу надходження глибинної речовини призводить до закупорки вивідних каналів і прориву газів у нових місцях, що зумовлює ріст деревоподібних форм. У місцях суцільної цементації потік флюїдів взагалі припиняється. У спокійних умовах осадоконакопичення такі "курці" перекриваються осадами, у динамічних умовах їхні уламки виносяться на поверхню у вигляді фрагментів плит і покривів.

Пощаровий аналіз хімічного складу кірок (табл. 1) показав, що білі й жовтуваті кірки, шовні виділення складені більш ніж на 80 % карбонатною речовиною з незначною домішкою аутигенного кремнезему та глинистого матеріалу. Вміст мікроелементів у кіркових утвореннях, а також у тілі "курців" наведено в табл. 2.

Шар глинистих вапняків також характеризується високим вмістом карбонатів – до 70 %. Карбонатизація має цементацийний тип, виконуючи порожнечі у пористому, насиченому водою осаді. Відзначимо, що для отримання якісної характеристики вторинного карбонату кальцію

проба для аналізу була очищена від раковин молюсків, що містяться у цьому шарі. Можливо, що деяка кількість карбонатної речовини зумовлена наявністю в пробі дрібних уламків раковинного детриту. Відносно невисокий вміст алюмінію підтверджує, що глинисті мінерали, які становлять основну масу тонкодисперсних компонентів осаду, присутні у підпорядкованій кількості і крупнопелітові фракції складені головним чином тонкодисперсним карбонатом кальцію в суміші з глинистими агрегатами, мінералами оксидів заліза і кварцу. Слабкозмінені осади нижнього шару кірок містять до 60 % карбонатів і приблизно 30 % глинистої компоненти.

При порівнянні результатів аналітичних досліджень складу "курців", піднятих із глибин 160–200 м у Чорному морі (табл. 1, 2) і з глибин 170–300 м у Південно-Китайському морі (табл. 3, 4) можна побачити деякі розбіжності. У першу чергу це стосується силікатної і карбонатної складових, які мають більші значення SiO_2 на в'єтнамсь-

кому шельфі за рахунок зменшення CaO і MgO . Ці розбіжності можна пояснити різними джерелами глибинної речовини, що надходить на дно у складі флюїдів. Наведені дані дозволяють припустити, що існують варіації у складі флюїдних потоків та їхня генетична неоднорідність. Проте основним газовим компонентом залишається метанова складова (Сокур і Омельчук, 2019¹, 2019²).

Склад чорноморських "курців" відрізняється від кіркових утворень високим ступенем чистоти карбонатної складової, що представлена арагонітом з незначною домішкою доломіту. Кірки та плити характеризуються переважно анкеритовим складом. Це можна пояснити інтенсивною взаємодією рідкої фази з осадовим матеріалом донних відкладів. У разі відсутності такої взаємодії, при підвищених дебітах, зростання "курців" відбувається внаслідок біохемогенного осадження карбонатної речовини. Про це свідчить і те, що свіжі уламки "курців" покриті слизуватою оболонкою метанпереробних бактерій завтовшки до 1 см, продуктом метаболізму яких є арагоніт.

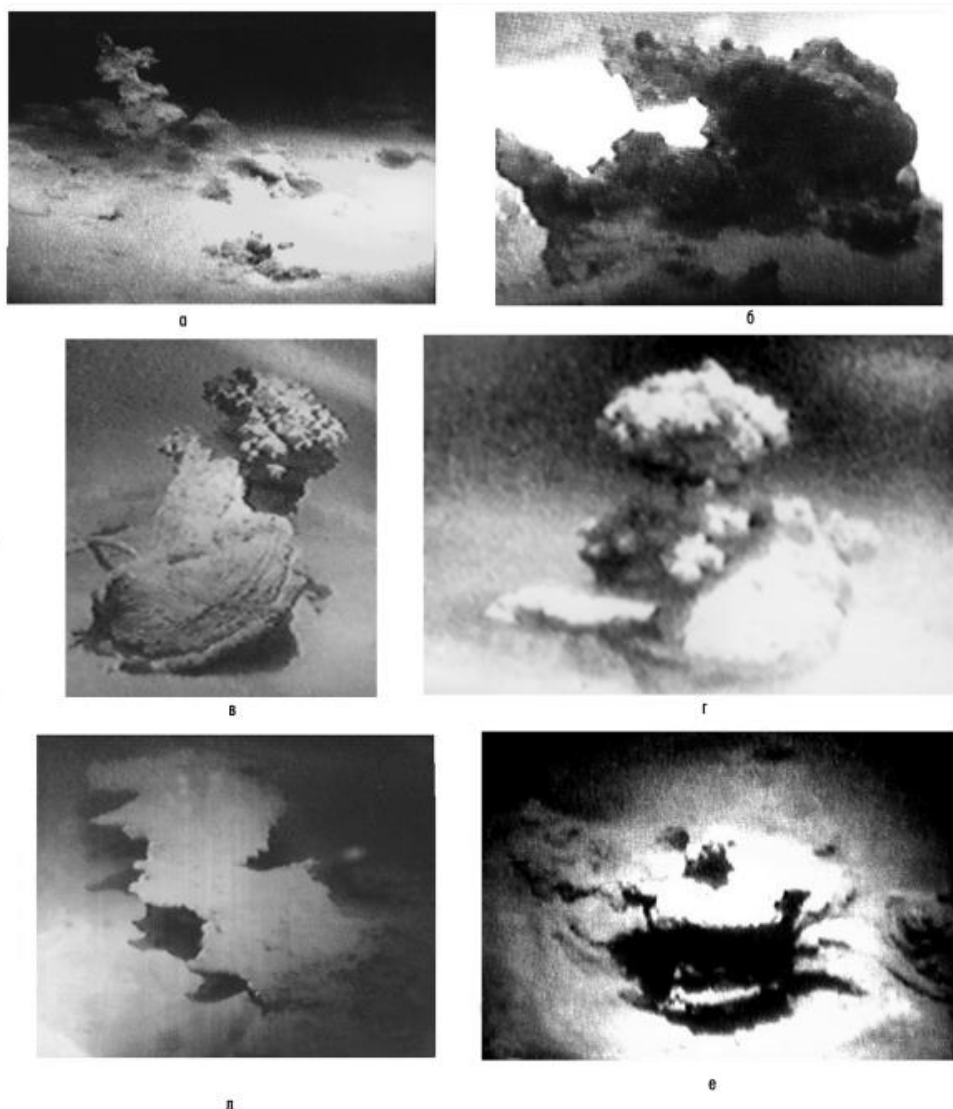


Рис. 1. Типи донних карбонатних споруд у межах газовиділень:

а – уламки карбонатних порід, на задньому плані на відстані приблизно 4,5 м – деревоподібна карбонатна споруда (білі плями на споруді і білий "пух" на поверхні мулу – скупчення бактерій або "бактеріальний мат"); б – занурена у мул масивна плита (розмір по основі – 1,2 м) з надбудовами газовивідних каналів; в – деревоподібний "курець", увінчаний коралоподібним наростом вивідного каналу, розмір в основі близько 1 м; г – діючий "курець" у вигляді грибоподібної споруди, увінчаної трьома коралоподібними вивідними каналами (основа – 1,5 м, висота – 2 м, біле на поверхні "курця" – товстий шар бактеріального слизу, праворуч – пляма бактеріальних матів і "пух" донного субстрату, піднятий від торкання дна апаратом); д – поверхнева тонка кірка (2×30×200 см), що навісає над осадами (порожнеча під кіркою зумовлена розмивом осадів придонними течіями); е – блюдцеподібне пониження з округлосплощеним "курцем" у центрі, увінчаним коралоподібним газовивідним каналом

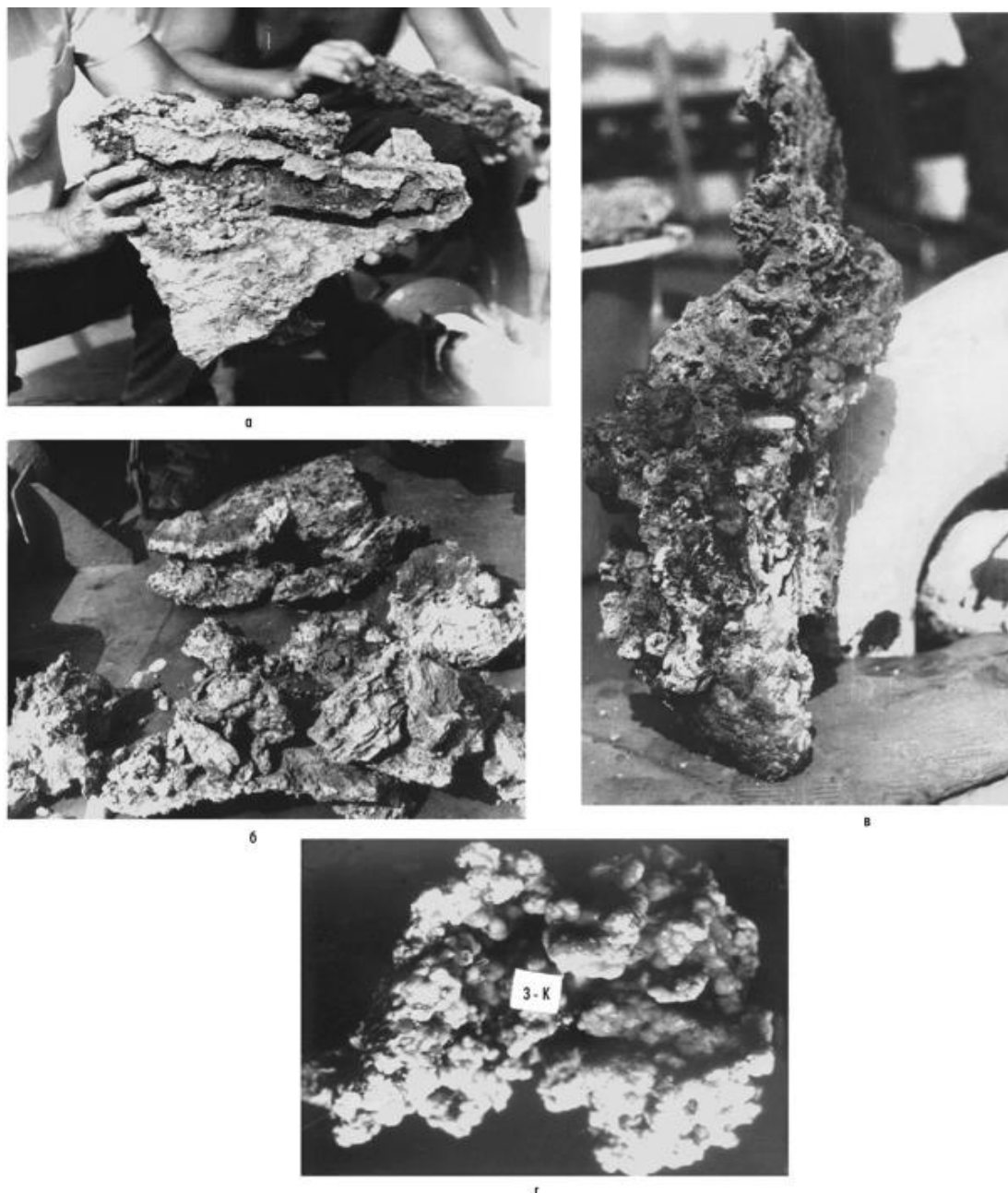


Рис. 2. Фрагменти "курців" на палубі судна:

а, б – уламки плитчастих і плоских коралоподібних форм;
в – трубчастий, деревоподібний фрагмент (висота 53 см); г – уламок коралоподібного "курця" (розмір 25×27 см)

Визначення складу бактеріальних угруповань виконано в Інституті геологічних наук та Інституті мікробіології і вірусології НАН України. Для досліджень отримані проби придонного шару води і поверхневого шару донних відкладів полів газовиділень, розташованих у діапазоні глибин 60–110 м (вище зони сірководневого зараження), які порівнювалися з даними, отриманими на фонових станціях поза межами полів газовиділень. У водній товщі кількість бактеріальних кліток варіює у досить широких межах – від $2 \cdot 10^2$ до $3,3 \cdot 10^3$ у 100 мл морської води. Фіксуються форми метанпереробних бактерій *Methylomonas methanica* (Пялько і др., 1978). На фонових станціях ці форми не виявлено. В осадах кількість бактеріальної мікрофлори зростає на порядок, проте у складі угруповань виявляються азот-, сірководень- і залізобактерії.

Глибинна дегазація може супроводжуватися і утворенням інших форм газовивідних каналів, що може бути

пов'язане з темпами дегазації і складом газів. Так, на кавказькому шельфі фіксувалися структури просідання осадів, воронки у вигляді чорних плям – "віспин" діаметром до 50 см. Центральна частина віспин є газовивідним каналом, стінки якого міцно зцементовані карбонатно-залізістим цементом. Ці форми детально були вивчені у Північному морі (Havland, 1984; Havland et al., 1987) та на шельфі В'єтнаму (Сокур і Омельчук, 2019¹, 2019²).

Необхідно відзначити, що у Чорному морі у складі газів "курців" переважає метан, сірководень займає підпорядковане значення, спорути карбонатного складу. Чорноморські джерела низькотемпературні і з низькими дебитами. Генезис "чорноморських курців" зумовлений взаємодією геологічних факторів, одним з яких є надходження продуктів розкладання газогідратного покладу по розломах у водну товщу, що може бути використано для прогнозування і пошуків нетрадиційної вуглеводневої сировини (Геворк'ян, 2005).

Таблиця 1

Результати хімічного аналізу зразків карбонатних споруд "чорноморських курців", wt%

Ком- по- нент	Зразок 1-к			Зразок 3	Валова проба	Сфе- роліти		7	8	9	10	11	12	13
	(шар2)	(шар3)	(шар5)											
	1	2	3											
SiO ₂	13,02	18,49	29,28	64,57	0,15	0,03		2,49	0,17	0,14	0,88	4,82	4,45	4,38
TiO ₂	Сл.	Сл.	Сл.	0,42	–	–		0,04	<0,02	<0,02	<0,02	0,08	0,06	0,07
Al ₂ O ₃	1,12	2,90	4,35	6,98	–	–		0,78	0,06	0,11	0,42	1,86	1,49	1,42
Fe ₂ O ₃	1,39	0,84	1,17	1,57	0,17	0,05		0,46	0,07	0,12	0,24	0,79	0,62	0,65
FeO	0,68	0,53	0,76	1,29	0,23	0,76		<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20	<0,20
MnO	0,18	0,02	–	0,02	–	0,34		0,06	0,11	0,15	0,11	0,10	0,07	0,11
CaO	40,83	39,00	31,69	7,78	51,56	50,31		48,06	48,38	47,66	45,93	42,18	45,56	44,49
MgO	2,74	2,43	1,90	2,29	1,59	2,39		4,10	3,69	4,20	4,20	4,92	3,90	4,92
P ₂ O ₅	0,19	0,13	0,11	0,13	0,05	0,05		0,11	0,18	0,20	0,13	0,13	0,11	0,12
K ₂ O	0,50	0,77	1,00	1,77	–	–		0,15	<0,10	<0,10	<0,10	0,37	0,29	0,25
Na ₂ O	0,76	0,70	0,83	1,46	0,65	–		0,33	0,45	0,36	0,54	0,63	0,49	0,50
H ₂ O	0,13	0,12	0,29	0,82	0,06	0,05		0,22	0,48	0,60	0,46	0,64	0,52	0,52
LOI	37,76	33,79	27,50	9,82	44,99	45,98		42,48	44,20	45,50	42,70	41,96	41,54	41,82
S _{общ}	Не визначалось				0,16	0,24		Не визначалось						
S _{сульфат}	0,11	0,22	0,15	0,11	Не визн.			0,12	0,12	0,12	0,47	0,50	0,12	0,12
S _{сульфід}	0,19	0,14	0,24	0,46	Не визн.			0,13	1,48	0,27	3,32	0,59	0,29	0,14
Сума	99,60	100,08	99,27	99,49	99,79	100,10		99,73	99,66	99,75	99,72	99,77	99,71	99,71
Sr	Не визначалось							0,11	0,29	0,16	0,25	0,12	0,09	0,13
Cl	Не визначалось							0,26	0,37	0,25	0,50	0,66	0,41	0,38
BaO	Не визначалось							0,18	1,62	0,78	3,35	0,65	<0,10	0,21

1 – карбонатна кірка на поверхні мулів; 2 – мул, зцементований до глинистого вапняку; 3 – мул, слабозцементований з цілими раковинами і детритом; 4 – фонові проби мулу сірого із зеленуватим відтінком, очищеного від раковинного детриту; 5, 6 – зразок "курця"; 7–13 – за даними (Шнюков і др., 2001) (вміст у % на висушену речовину при 105°C): 7 – зжужжена частина тіла "курця"; 9, 11 – розширення трубчасті частини "курця"; 8, 10 – зовнішній шар "курця"; 12, 13 – внутрішня частина тіла "курця". Інші примітки див. табл. 3.

Таблиця 2

Вміст мікроелементів у продуктах діяльності "чорноморських курців", ppm

Елемент	Зразок 1-к (карбонатна кірка)		Зразок 2-к (глинистий вапняк)		Зразок 4к-3 ("курець")		7	8	9	10	11	12	13
	Валова проба	Очищена від нальотів	Інтенсивне цементування	Шар слабого цементування	Валова проба	Сфе- роліти							
	1	2	3	4	5	6							
Ba	1000	1200	1500	1500	1200	2700	1660	12400	5500	20400	5800	780	1200
Be	1	1	1	1	1	1	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Pb	5	4	5	5	4	2	85	6	2	1	4	1	4
Sn	≤1	1	≤1	1	1	1	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
W	3,2	3	3	2	3	1	–	–	–	–	–	–	–
Nb	100	100	100	100	100	30	–	–	–	–	–	–	–
Cr	10	35	10	13	63	55	–	–	–	–	–	–	–
Ni	15	4	12	15	5	12	–	–	–	–	–	–	–
Bi	1,21	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–
Co	2	1	1,5	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–
Mo	2,5	2	0,8	1	0,8	1	–	–	–	–	–	–	–
V	8	3	6,3	6	≈2	5	–	–	–	–	–	–	–
Cu	8	2	6,5	5	1	3	48	5	<3	4	5	3	11
Zn	20	20	20	23	20	32	21	13	9	8	14	15	13
Zr	80	50	63	65	40	12	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Ag	0,02	0,02	0,02		0,02	0,5	–	–	–	–	–	–	–
Cd	4	5	4	4	4	7	–	–	–	–	–	–	–
Y	12	10	10	10	10	10	3	<1	1	2	5	4	5
Yb	1,2	1	1	1	≤1	1	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
La	15	10	15	15	10	15	–	–	–	–	–	–	–
Ce	32	30	30	25	30	30	21	26	<15	<15	<15	17	<15
Sr	400	700	320	300	5000	7000	900	1810	1350	2178	910	754	1025
In	1	1	1	1	1	1	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.
Ge	≤1,2	1	1	1	1	1	–	–	–	–	–	–	–
Hf	3	3	3	1	3	1	–	–	–	–	–	–	–
Sc	6,3	6	6,3	5	6,3	5	–	–	–	–	–	–	–
Au	1,0	1,0	1,0	0,8	1,0	1,2	–	–	–	–	–	–	–
U	5,0	5,5	5,0	3,2	5,0	5,0	–	–	–	–	–	–	–
Th	32	35	32	32	32	50	–	–	–	–	–	–	–
Ti	2	2	2	2	2	2	–	–	–	–	–	–	–
Li	10	10	10	10	10	7	–	–	–	–	–	–	–
As	65	65	65	100	65	70	–	–	–	–	–	–	–
Sb	32	30	32	35	32	25	–	–	–	–	–	–	–

Закінчення табл. 2

Ta	32	30	32	30	32	25	—	—	—	—	—	—	—
Br	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	н.в.	3	<1	1	9	13	12	8
Rb	—	—	—	—	—	—	н.в.	2	<2	52	14	9	12
Mn	—	—	—	—	—	—	—	964	1260	875	445	342	722
Fe	—	—	—	—	—	—	—	340	410	1440	6260	4750	4470

1–6 – результати уточненого кількісно-напівкількісного емісійного спектрального аналізу; 7–13 – результати рентгенофлуоресцентного аналізу (XRF) проб тіла метанового "курця" (Шнюков и др., 2001); н.в. – елемент не визначався.

Таблиця 3

Результати хімічного аналізу зразків карбонатних споруд західної частини Південно-Китайського моря, wt%

Компонент	№ зразка					
	198/ТС 27, зразок 1	198/ТС 27, зразок 2	198/ТС 27, зразок 3	ПА-18, зразок 1	13/ДТ 6, зразок 1	13/ДТ 6, зразок 2
	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	35,03	33,34	29,72	21,10	30,15	18,01
TiO ₂	0,35	0,33	0,30	0,27	0,36	0,23
Al ₂ O ₃	8,07	7,60	6,50	5,78	7,90	4,54
Fe ^{total} ₂ O ₃	1,95	1,87	1,70	4,70	2,67	1,54
MnO	0,05	0,04	0,04	0,49	0,49	0,26
MgO	10,92	11,16	12,25	7,45	5,46	3,45
CaO	16,89	17,58	19,49	24,64	23,70	35,09
Na ₂ O	1,18	1,10	1,04	1,14	1,19	1,16
K ₂ O	1,23	1,17	1,03	0,96	1,25	0,68
P ₂ O ₅	0,14	0,15	0,15	0,39	0,11	0,07
S	0,05	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01
Cl	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03
H ₂ O-	0,71	0,45	0,44	1,06	1,00	0,78
LOI	23,00	24,74	26,89	31,57	25,25	33,76
Сума	99,59	99,58	99,61	99,59	99,59	99,61

Fe^{total}₂O₃ – загальне Fe в перерахунку на Fe₂O₃; H₂O – вологість проби (втрата маси при просушуванні при 110 °C); LOI – втрата маси при прокалюванні (1100 °C) сухої проби. Аналіз (XRF) виконаний у лабораторії рентгенівських та мікроскопічних досліджень мінеральної речовини кафедри мінералогії, геохімії та петрографії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, аналітик В.В. Загородній.

Таблиця 4

Вміст мікроелементів у "курцях" західної частини Південно-Китайського моря, ppm

Елемент	№ зразків						
	198/ТС 27, зразок 1	198/ТС 27, зразок 2	198/ТС 27, зразок 3	ПА-18, зразок 1	13/ДТ 6, зразок 1	13/ДТ 6, зразок 2	Межа визначення
	1	2	3	4	5	6	7
Fe	12386	12888	11284	34667	18894	10843	200
Ni	11	7	2	11	36	37	15
Cu	2	1	2	0	4	3	15
Zn	42	38	32	53	56	44	15
Ga	4	5	4	5	4	1	10
As	0	0	0	36	14	12	5
Br	8	10	11	10	21	24	5
Rb	42	44	38	33	47	26	5
Sr	535	531	594	493	1684	5004	5
Y	10	10	9	12	8	0	5
Zr	147	130	118	71	122	35	5
Nb	4	3	3	3	2	5	5
Pb	10	10	10	9	9	3	5
I	18	20	16	24	45	45	15
Ba	197	184	166	145	178	103	15
La	18	13	15	12	10	7	15
Ce	26	26	27	20	33	17	15
Pr	3	2	1	1	0	0	15
Nd	8	8	8	6	7	5	15

0 – вміст елемента нижчий за межу виявлення аналізу. Аналізи (XRF) виконано у лабораторії рентгенівських та мікроскопічних досліджень мінеральної речовини кафедри мінералогії, геохімії та петрографії ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка, аналітик О.В. Андреев.

Особливо слід зауважити передумови для формування пов'язаних із "курцями" родовищ вуглеводнів у Чорному морі, де ймовірно існування аналогів таких великих і навіть гігантських нафтових (газоконденсатних, газових) родовищ, які було відкрито на Південно-В'єтнамському шельфі (Білий Тигр, Дракон та ін.).

У Південно-Китайському морі карбонатні споруди пов'язані з процесами окиснення метану метанотрофними бактеріями у виходів висхідних вуглеводнево-газових джерел (сипи, міграція вуглеводневих газів по розламах). Ізотопно-геохімічні дані підтверджують розмаїття їхньої природи й

утворення, яке пов'язане з метаболізмом мікроорганізмів, приурочених до труб дегазації. На рис. 3 показано фрагменти "курців", зразки яких були відібрані на західному шельфі Південно-Китайського моря.

Крім сприятливих передумов рифоутворення (роль виступів і підняття кристалічних порід – як основи для різноманітних карбонатних споруд), а також фізико-хімічних особливостей гранітного субстрату, що сприяють бактеріальному кірковому і матоутворенню, неабияку роль може відігравати карбонатотвірна діяльність специфічних

екосистем, які ініціюють мікробіологічні процеси. Формування вуглеводневих покладів, у підсумку, зумовлене процесами глибинної дегазації Землі (Лукин, 2007).

Висновки. Слід зазначити, що як Чорне, так і Південно-Китайське море характеризуються загальними рисами, пов'язаними з глибинною вуглеводневою дегацією, що зумовлює значну перспективність пошуків вуглеводневої сировини. Великі площі, зайняті такими дегазаційними карбонатними спорудами, і приуроченість до труб дегазації гетерогенних карбонатних масивних резервуарів свідчать про тектоно-геодинамічну схожість цих двох регіонів. А оскільки на в'єтнамському

шельфі вже відкриті і розробляються великі родовища нафти і газу, перспективи відкриття промислових родовищ вуглеводневої сировини у Чорному морі досить значні, тому пошуки, розвідка і розробка можуть бути рентабельними в умовах чорноморського шельфу.

Подальші дослідження "курців" Чорного моря дадуть безсумнівні перспективи у забезпеченні енергетичної незалежності України, оскільки карбонатні споруди безпосередньо пов'язані з газогідратними покладами та скупченням підгідратного газу, що дає можливість у майбутньому використовувати екологічно чисту вуглеводневу сировину.



Рис. 3. "Курці" західної частини Південно-Китайського моря

Список використаних джерел

- Бондарев, И.П. (1990). Биоэрозия или газоиндукция. *Геол. журнал*, 4 (253), 55–62.
- Геворкьян, В.Х., Бураков, В.И., Исагулова, Ю.К. и др. (1991). Газо-выделяющие постройки на дне северо-западной части Черного моря. *Докл. АН УССР*, 4, 80–85.
- Геворкьян, В.Х., Чугунный, Ю.Г., Сорокин, А.Л. и др. (1990). Геологические аспекты биологической продуктивности океана. Мурманск: Мурман. книж. изд-во.
- Геворкьян, В.Х., Сокур, О.Н. (2005). Генетические особенности черноморских "курильщиков". *Геол. журнал*, 2 (312), 68–82.
- Иванов, М.В., Поликарпов, Г.Г., Леин, А.Ю. и др. (1991). Биогеохимия цикла углерода в районе метановых газовых выделений Черного моря. *Докл. АН СССР*, 320, 5, 1235–1240.
- Лукин, А.Е. (2007). Биогенно-карбонатные постройки на выступках разуплотненных кристаллических пород – перспективный тип комбинированных ловушек нефти и газа. *Теория и практика*, 2, 1–21. Отримано з <http://www.ngtrp.ru/>.
- Лялько, В.И., Малашенко, Ю.Р., Митник, М.М. (1978). Геологическая деятельность углеводородных организмов. *Докл. АН УССР*, 4, 305–309.

- Поликарпов, Г.Г., Егоров, В.Н., Нежданов, А.И. и др. (1989). Явления активного газовыделения из поднятий на свале глубин западной части Черного моря. *Докл. АН УССР*, Сер. Б, 12, 13–15.
- Сокур, О.Н., Омельчук, А.В. (2019¹). Карбонатные постройки шельфовых зон как критерий прогнозирования залежей и поисков углеводородного сырья. *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького національного університету*, 21, 1 (41), 54–68.
- Сокур, О.Н., Омельчук, А.В. (2019²). Донные карбонатные постройки – объекты для поисков углеводородного сырья. *Геол. журнал*, 2 (367), 38–48.
- Шнюков, Е.Ф., Григорьев, А.В., Безбородов, А.А. и др. (1990). Экспедиционные исследования в Черном море (51-й рейс НИС "Михаил Ломоносов", 11.11–14.12 1989 г.). *Геол. журнал*, 4 (253), 130–133.
- Шнюков, Е.Ф., Старостенко, В.И., Гожик, П.Ф. и др. (2001). О газоотдаче дна Черного моря. *Геол. журнал*, 4 (298), 7–14.
- Havland, H. (1984). Gas-induced erosion features in the North sea. *Earth surface processes and landforms*, 9, 3, 209–228.
- Havland, H., Talbot, M.R., Quale, H. et al. (1987). Methane-related Carbonate Cements in Pockmarks of the North Sea. *J. Sediment. Petrol.*, 57, 881–891.

References

- Bondarev, I.P. (1990). Bioerosion or gas induction. *Geologichnyy zhurnal*, 3 (253), 55-62. [in Russian]
- Gevorkian, V.H., Burakov, V.I., Isagulova, Yu.K., Semenov, D.V., Malaxov, V.P., Oleinik, F.I., Gryazanov, A.S., Shevchenko, A.F. (1991). Gas take out of construction at the bottom of northwest part of the Black sea. *Doklady AN USSR*, 4, 80-85. [in Russian]
- Gevorkian, V.H., Chugunnyy, Yu.G., Sorokin, A.L., Luka, G.I., Pavlov, A.I. (1990). Geological aspects of biological productive of ocean. Murmansk. [in Russian]
- Gevorkian, V.H., Sokur, O.N. (2005). Genetic peculiarities of the Black Sea "smokers". *Geologichnyy zhurnal*, 2 (312), 68-82. [in Russian]
- Havland, H. (1984). Gas-induced erosion features in the North sea. *Earth surface processes and landforms*, 9, 3, 209-228.
- Havland, H., Talbot, M.R., Quale, H., Olausson, S., Aasberg, L. (1987). Methane-related Carbonate Cements in Pockmarks of the North Sea. *J. Sediment. Petrol.*, 57, 881-891.
- Ivanov, M.V., Polikarpov, G.G., Lein, A.Yu., Galchenko, V.F., Egorov, V.N., Gulin, S.B., Gulin, M.B., Rusanov, I.I., Miller, Yu.M., Kuptsov, V.I. (1991). Biogeochemistry of a cycle of carbon in area methane gas take out of the Black Sea. *Doklady AN SSSR*, 320, 5, 1235-1240. [in Russian]
- Lukin, A.E. (2007). Biogenetic carbonate of structures on ledges decompaction of crystalline rock - perspective type of the combined snare of

oil and gas. *Oil and gas geology. Theory and practice*, 2, 1-21. Retrieved from <http://www.ngtp.ru>. [in Russian]

- Lyalko, V.I., Malashenko, Yu.R., Mitnick, M.M. (1978). Geological activity carbonoxidize organism. *Doklady AN USSR*, 4, 305-309. [in Russian]
- Polikarpov, G.G., Egorov, V.N., Nezhdanov, A.I., Gulin, S.B., Kilev, Yu.D., Gulin, M.B. (1989). The phenomenon active gas take out from climb on down of depths of western part of the Black Sea. *Doklady AN USSR*, Series B, 12, 13-15. [in Russian]
- Shnyukov, E.F., Grigoryev, A.V., Bezborodov, A.A., Mavrenko, N.I. (1990). Expeditionary researches in the Black Sea (51 trip "M. Lomonosov", 11.11-14.12. 1989 year). *Geologichnyy zhurnal*, 4 (253), 130-133. [in Russian]
- Shnyukov, E.F., Starostenko, V.I., Gozhik, P.F., Kleschenko, S.A., Kutnyi, V.A., Shnyukova, E.E. (2001). Gas take out bottom of the Black Sea. *Geologichnyy zhurnal*, 4 (298), 7-14. [in Russian]
- Sokur, O.N., Omelchuk, A.V. (2019). Carbonate structures of shelf zones as a criterion of forecasting depositions and searches for hydrocarbon raw material. *Geology and mineralogy bulletin of Kryvyi Rih National University*, 21, 1 (41), 54-68. [in Russian]
- Sokur, O.N., Omelchuk, A.V. (2019). Bottom carbonate structures of objects for searches of hydrocarbon raw material. *Geologichnyy zhurnal*, 2 (367), 68-82. [in Russian]

Надійшла до редколегії 11.11.19

O. Omelchuk, PhD (Geol.-Min.)

E-mail: msstesha@ukr.net,

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

O. Sokur, PhD (Geol.)

E-mail: bytit@ukr.net,

Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine,
55-B Gonchar Str., Kyiv, 01054, Ukraine

PROCESSES OF DEEP OUTGASSING OF THE EARTH AS THE CAUSE OF BOTTOM CARBONATE BUILDUP FORMATION IN THE OCEAN SHELF ZONES

Bottom carbonate buildups of northwest of the Black Sea and western shelf of the South China Sea are considered in the article. The actual material for these researches was received when carrying out submarine works with application of underwater laboratory "Bentos-300" in the Black Sea and submersible vehicle "Sever-2" in the South China Sea.

As a result of researches gas emissions from bottom depositions and carbonate buildups were discovered at depths of 160-300 m. Investigation of landscape and geological setting on seabed was carried out by direct observation of gas emission fields. It was established within their limits that gas component is only one portion of fluid flow which formation is caused by deep outgassing processes of the Earth. The main portion is represented by fluid mineralized phase saturated with soluble compounds. In the marine water which is characterized by different hydrochemical parameters superimposed biogenic sedimentation, predominantly calcium carbonate occurs from fluid flow.

Relation between buildup types, sea depth and bottom relief is defined. The most carbonate buildups are confined to vertex sites of ridges. On slopes the buildups are rare and their number decreases. Cover formations of solid very strong rocks in the form of massive blocks that is 40-60 cm thick prevail at depths of 160-190 m. Distribution pattern of calcium carbonate over the section of crusts and tabular shapes points to the relation between a source of carbonates with lateral distribution of mineralized waters in near-bottom layer on the surface of sedimentary substrate.

Comparative data on composition of carbonate buildups of Black and Southern Chinese Seas testify for their common features of deep hydrocarbon outgassing and tectono-geodynamic similarity between areas of their distribution. Considering the fact that within the shelf area of Vietnam, giant oil and gas fields have already been discovered and are under exploration, prospects for discovery of similar deposits in northwest part of the Black Sea are rather reasonable. Results of studying of carbonate formations in the Black Sea can be used for forecasting and prospectings of hydrocarbon raw material.

Keywords: deep outgassing of the Earth, carbonate buildups, hydrocarbon raw material, shelf zones of the ocean.

A. Omelchuk, канд. геол.-минералог. наук

E-mail: msstesha@ukr.net,

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,

УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;

О. Сокур, канд. геол. наук

E-mail: bytit@ukr.net,

Институт геологических наук НАН Украины,
ул. О. Гончара, 55-б, г. Киев, 01054, Украина

ПРОЦЕССЫ ГЛУБИННОЙ ДЕГАЗАЦИИ ЗЕМЛИ КАК ПРИЧИНА ОБРАЗОВАНИЯ ДОННЫХ КАРБОНАТНЫХ ПОСТРОЕК В ШЕЛЬФОВЫХ ЗОНАХ ОКЕАНА

Рассматриваются донные карбонатные образования северо-западной части Черного моря и западного шельфа Южно-Китайского моря. Фактический материал для данных исследований был получен при проведении подводных работ в Черном море с помощью подводной лаборатории "Бентос-300" и в Южно-Китайском море с применением подводного аппарата "Север-2".

В результате проведенных исследований были обнаружены выделения газов из донных отложений, а также из карбонатных построек на глубинах 160–300 м. Ландшафтно-геологическая обстановка на морском дне изучалась с помощью прямых наблюдений полей газовыделений. В их границах было установлено, что газовая компонента является только частью флюидного потока, формирование которого обусловлено глубинными процессами дегазации Земли. Основная составляющая его приходится на жидкую минерализованную фазу, насыщенную растворимыми соединениями. В морской воде, характеризующейся иными гидрохимическими параметрами, происходит процесс наложенного биохимического осаждения из флюидного потока, преимущественно карбоната кальция.

Определена связь типов построек с глубиной моря и рельефом дна. Наибольшее количество карбонатных образований приурочено к вершинным участкам гряд, на склонах постройки разрежены и количество их уменьшается. На глубинах 160–190 м преобладают покровные образования монолитных, очень прочных пород в виде массивных блоков толщиной 40–60 см. Характер распределения карбоната кальция по разрезу корок и плитчатых форм указывает на связь источника карбонатов с латеральным распределением минерализованных вод в придонном слое по поверхности осадочного субстрата.

Сравнительные данные о вещественном составе карбонатных построек Черного и Южно-Китайского морей свидетельствуют о том, что они характеризуются общими чертами глубинной углеводородной дегазации, а также тектоно-геодинамическим сходством районов их распространения. Учитывая то, что в пределах вьетнамского шельфа уже открыты и разрабатываются крупные месторождения нефти и газа, перспективы открытия аналогичных месторождений в северо-западной части Черного моря являются достаточно обоснованными. Результаты изучения карбонатных образований в Черном море можно использовать для прогнозирования и поисков углеводородного сырья.

Ключевые слова: глубинная дегазация Земли, карбонатные постройки, углеводородное сырье, шельфовые зоны океана.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

UDC 911+556.36

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.89.15>

D. Chomko, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: Dimath@ukr.net,
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
F. Chomko, Assoc. Prof.,
V.N. Karazin Kharkiv national university,
School of Geology, Geography, Recreation and Tourism,
4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine;
N. Cherkashyna, Senior Lecturer,
V.N. Karazin Kharkiv national university,
School of Foreign Languages, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

ARTIFICIAL HYDROGEOLOGICAL WINDOWS AS A SOURCE OF BUCHAK-KANIV AQUIFER'S POLLUTION IN THE NORTH-EAST OF UKRAINE

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

A new method for determining the location of artificial hydrogeological windows in the roof and base of the aquifer has been proposed. As an example, the Buchak-Kaniv aquifer is given. This aquifer is widespread in the north-eastern part of Ukraine and is the main source of water supply for the region. In our opinion, pollution of the Buchak-Kaniv aquifer can occur primarily through artificial hydrogeological windows in its roof and bottom. In order to determine the location of artificial hydrogeological windows, factor analysis of the chemical composition of groundwater aquifer is used. The analysis was first carried out in places where it is precisely known about anthropogenic contamination of the aquifer with oil products and associated waters through artificial hydrogeological windows (for example, oil or other wells). As a result, a number of influential factors weighing more than 10% were identified. Further, in other areas factor analysis is also carried out using the same set of components of the chemical composition of groundwater. The coincidence of influencing factors indicates the theoretical possibility of an artificial hydrogeological window in a given area.

In addition, various options for the distribution of pollutants over the horizon area are considered.

The identification of these windows is important for identifying sources of aquifer pollution. Especially attractive will be the use of this method in areas where old (working and closed) oil, gas and oil-gas condensate fields are located.

Keywords: Buchak-Kaniv aquifer, artificial hydrogeological windows, aquifer pollution, factor analysis, oil and gas fields.

Introduction. Buchak-Kaniv aquifer is widely developed within the north-eastern part of Ukraine and is its main source of water supply. It is intensively used in the city of Kharkiv, Poltava, Sumy and practically in all rural settlements. This aquifer is also used for water supply of industrial facilities and drilling in the extraction of oil and gas. In Poltava region, water of this aquifer is used for bottling as table water ("Gogolivska", "Veselo-Podilska").

Within the northeast of Ukraine, Buchak-Kaniv aquifer is reliably protected from pollution in natural conditions because the regional aquitard of Kyiv sediments and a thick stratum of marl and chalk deposits inhibit the hydraulic connection of this aquifer with overlying and underlying aquifers and complexes.

As a result of prolonged and intensive operation of the aquifer, the hydrostatic head has now been reduced by 10–20 m, chemical composition is changing, and groundwater often becomes polluted (Руденко, 1972; Камзист та Шевченко, 2009).

Many researchers have studied this aquifer in natural and disturbed conditions (Руденко, 1972; Сухно, 1973; Варрава и др., 1977; Шестопалов и др., 1989, 1991; Чомко, 2000; Камзист та Шевченко, 2009; Левонюк, 2017). According to their data, the water bearing rocks are gray, greenish-gray fine-, fine- and heterogeneous sands of Buchak and Kaniv suites. Buchak-Kaniv aquifer lies on the marl-Cretaceous sediments of the Upper Cretaceous and Eocene rocks (Luzanovska suite). The roof of the aquifer lies at a depth of 130 to 145 m. The thickness of the aquifer is 17–35 m. Buchak-Kaniv aquifer is covered by dense Kyiv marls and clays, which determines its pressure character. The aquitard reaches 25–100 m. The static level is at a depth of 115–45 m.

Water content of Buchak-Kaniv deposits varies widely. The well flow rates vary from 0.04 to 11.1 dm³/s at the slopes of 16 and 30 m, respectively.

The waters of this aquifer are fresh. By chemical composition, hydrocarbonate sodium and hydrocarbonate-

chloride sodium are isolated with mineralization not exceeding 0.5–1.2 g/dm³ and chloride-hydrocarbonate sodium and chloride sodium with mineralization from 1 to 3 and from 3 to 5 g/dm³. The reaction of water in most cases is slightly alkaline (pH=7.2–8.4). Total hardness varies from 1.6 to 10.0 meq/dm³.

The following micro-components were found in the water: bromine from 0.5 to 1.24 mg/dm³, iodine to 0.16 mg/dm³, fluorine from 0.4 to 6.4 mg/dm³.

Hydrochemical zonality of this aquifer was studied by K.N. Varava, G.N. Negoda et al. (Варрава и др., 1977; Левонюк, 2017). According to their data, in the direction from the northeast (from the feeding area) to the southwest (to the unloading area), water changes according to chemical composition in the following sequence: HCO₃–Ca, SO₄; HCO₃–Na, Ca; HCO₃–Ca, Na; HCO₃–Na; Cl, HCO₃–Na; Cl–Na.

The supply of the aquifer occurs in places where the sediments are deposited on the surface, as well as in places where the waters of the underlying aquifers are discharged.

Many researchers believe that the main formation sources of the aquifer exploitation reserves are natural resources coming from the natural feeding areas of the aquifer and the elastic reserves of groundwater in it. Each of these sources has a different role (Руденко, 1972; Сухно, 1973; Варрава и др., 1977; Шестопалов и др., 1989, 1991; Левонюк, 2017).

Recently there have been publications, connected with general issues of Buchak-Kaniv aquifer pollution (Журавель и др., 1996, 1997; Васильев и др., 1997; Чомко и др., 2004).

Material and methods. In our opinion, pollution of Buchak-Kaniv aquifer could first and foremost occur through artificial hydrogeological windows in its roof and base (Чомко и др., 2003, 2017).

Under artificial hydrogeological windows we understand the shafts of old water intake wells, old and emergency gas and oil wells and emergency wells used to maintain reservoir pressure and burial of associated commercial waters (Чомко, 2000). Through the degraded shafts of these wells, Buchak-Kaniv

aquifer has a hydraulic link to the overlying Mezhygorsk-Obukhov and Quaternary aquifers contaminated within the oil treatment sites, storage bins and with the underlying Jurassic, Triassic and Carboniferous aquifer complexes containing saline waters and brines. On the territory of the north-eastern part of Ukraine there are several dozen or even hundreds of such emergency and old wells. The location of many of them is unknown. The size of these artificial windows in the roof and base of the aquifer is also unknown.

In classical style, presence of artificial hydro-geological windows at great depths is determined by various pollutants, unusual chemical elements and radicals in the underground waters, by decrease in pressure and their difference in adjacent aquifers (Мироненко и Румынин, 1982; Шестопалов и др., 2007).

To determine the location of artificial hydrogeological windows, we suggest using a factor analysis of Buchak-Kaniv aquifer's groundwater chemical composition (Йереског и др., 1980; Чомко, 2000; Чомко и др., 2002, 2005; Шестопалов и др., 2007). The research was carried out according to the following scheme.

At the first stage of the factor analysis the results of chemical analyzes of Buchak-Kaniv's aquifer groundwater located in Kachanovske oilfield have been processed. The crater of the emergency wells No. 35 and 65 is located there, and contamination of underground water with mineralized waters is well-known and is confirmed by such data.

In 1962, as a result of the accident at well No. 35 at a depth of 2315 m, a powerful outburst of oil and gas-water mixture occurred. After some time, the well 65 began to flow in. At the site of the well, a crater with a saline reservoir in the central part was formed. The rocks were washed to a depth of more than 40 m. For almost two months carbon brines were supplied to the aquifers and complexes of the upper hydrogeological floor.

As a result of the accident at wells No.35 and No.65, no less than 1500 tons of oil and 200,000 cubic meters of pulp with brines were delivered to the surface. The pulp contained about 20,000 tons of various salts, which came into the river Tashan (the right tributary of the Vorskla River), some of them were detained by dams, and some fell into the aquifers of the upper hydrogeological floor.

Moreover, for a long time the crater was a storage place for man-made drilling waste and a temporary storage of associated commercial waters.

At present, the crater has a diameter of approximately 190 m and average depth to the bottom is about 20 m, it is filled with highly mineralized reservoir waters. Therefore, the crater has become a powerful source of pollution of surface and groundwater, including the waters of Buchak-Kaniv aquifer (Журавель и др., 1997).

In 1997, in four wells, operating in Buchak-Kaniv aquifer at Kachanovske oil field, the MPC was exceeded for individual hydrochemical components.

Thus, in Well No.4 (CPSC), maximum Na permissible concentrations were exceeded 2 times, Li 1.1 times, petroleum products 2 times, mineralization 1.2 times. In the well of the GPRS, the maximum permissible concentration for Na was 2.3 times, Li – 1.5 times, mineralization – 1.4 times. In the water intake wells of the villages of Pogarshchyna and Kachanove, the MPC of petroleum products was recorded to be 1.3 and 1.6 times higher (Журавель и др., 1996; Васильев и др., 1997).

Results and discussion. The input data table contained the following variables for 8 wells: dry residue, oil products, pH, HCO₃, Cl, F, SO₄, Ca, Mg, Na, K, Cd, Br, Fe, Ba, NO₂ and NO₃. The elements in the matrix of initial coefficients in factor analysis are the coefficients of pair correlation between the initial data. Calculations according to the

program of factor analysis were carried out according to the generally accepted method.

Using the principal component method (R-modification factor analysis), it has been determined that there are five factors in the area of Kachanovske oil field, with weights greater than 10%, containing chemical elements whose bond strength is greater than 0.2.

The first factor (weight 21.65%) contains Na (bond strength 0.862), Fe (0.236), F (0.231), and Cd (0.215) have bond strength exceeding 0.2. The remaining elements are less important. The characteristic element of the first factor is Na.

The second factor (weight 19.55%) includes bromine (bond strength 0.933) and Cl (0.289). Fe (-0.278) and Na (0.253) have bond strengths greater than 0.2. The remaining elements are insignificant in the second factor. The main element of this factor is bromine.

The third factor (weight 15.83%) belongs to oil products (bond strength -0.864), F (0.534) and barium (0.314). SO₄ (0.280) and Cd (0.201) also have the bond strength exceeding 0.2. The main element of this factor is petroleum products and fluorine.

The first three factors contain the main elements characteristic of groundwater of the lower hydrogeological floor, in particular carbon brines.

The fourth factor (weight 12.04%) and the fifth factor (weight 10.81%) include the remaining elements. HCO₃ (0.259), Ca and Mg at 0.206 have the bond strength higher than 0.2 in the fourth, while NO₂ (0.237) and Mg (0.225) – in the fifth factor.

To determine distribution of these factors on the area, the Q-modifications of the factor analysis defined the loads of each factor for all wells. Distribution of these values made it possible to establish the fact that in the vicinity of the crater of emergency wells No.35 and 65, the first three factors intersect. This indicates contamination of Buchak-Kaniv aquifer groundwater by brine carbon.

Under the same scheme, the results of chemical analyzes of groundwater in Buchak-Kaniv aquifer in the area of Glinsky, Andriyashovsky, Perekopov and Anastasevsky oil and gas-condensate fields were also processed. The initial data table contained the same elements for all 16 wells operating in Buchak-Kaniv aquifer.

The first factor (weight 18.74%) contains Na (bond strength 0.664), Cd (0.276) and Fe (0.214) have the bond strength higher than 0.2. The remaining elements are insignificant. A characteristic element of the first factor is also Na.

The second factor (weight 16.57%) includes Cl (bond strength 0.782) and bromine (0.227). Fe (-0.219) and Na (0.212) have the bond strength greater than 0.2. The remaining elements do not play an important role in the second factor. The main element of this factor is chlorine.

The third factor (weight 12.36%) is barium (bond strength 0.889) oil products (-0.726), F (0.345) and SO₄ (0.269) and Cd (0.227) also have the bond strength greater than 0.2. The main element of this factor is barium and petroleum products.

The fourth factor is 11.84%, and the fifth factor is 10.05%.

Based on distribution results of the obtained factors on the research area, it was possible to establish that the same three first factors intersected on the territory of Glinske field and in the vicinity of emergency wells crater at Kachanovske field.

Consequently, by analogy with Kachanovske field, at Glinsky deposit, there is at least one artificial hydrogeological window. In our opinion, this could be an emergency or an old liquidated oil well or an emergency well that was used to maintain reservoir pressure, through which Buchak-Kaniv aquifer contaminated with mineralized waters.

N.E. Zhuravel, A.N. Vasiliev, P. V. Klochko, and others have studied the peculiarities of waters with increased density migration in fresh water. In their opinion, contamination of aquifers in oil fields is associated with inter-layer fluid flow over the annular space behind the column and tightness breach in the production columns and injection wells in case of accidents. The negative effects in both cases are similar. The nature of the accidents in the wells is determined by the technical state of the production columns, which in turn depends on the duration of the well operation, efficiency of the anodic and inhibitor protection, timeliness of detection and elimination of the overflow or non-tightness of the column (Журавель и др., 1997).

The detection time of production columns non-tightness, even if all the technological requirements are met, can range from several hours to one month. On average, a reservoir is depressurized in 2 wells during a year, the theoretical leakage of reservoir fluids due to one such case is estimated at 5–10 m³.

Migration of waters with increased density in the fresh water environment is largely determined by the combined action of two mechanisms – density convection and transverse hydro-dispersion (Мироненко и Румынин, 1982). Density convection leads to gravitational differentiation of solutions in density. With a planned piston displacement of fresh water by a saline solution, density convection promotes deformation of the displacement front: a more rapid advance of the heavy fluid occurs along the base of the formation and the front assumes an inclined position. In environments with high dispersion characteristics, deformation of the displacement front of the equilibrium fluids will be determined not only by differences in density, but also by mixing processes. Unfortunately, this complex process has not been studied enough.

The processes determined by the combined effect of dispersion and the gravitational differentiation of the equilibrium fluids prove to be especially complex in pulsed intake of solutions with an increased density from point sources into the aquifer.

In these conditions an intrusion of dense, highly mineralized solutions is formed near the source, streamlined

by the natural (regional) flow of groundwater. The complexity of water migration forecast in such cases, in addition to the three-dimensionality of the problem, is exacerbated by the need to jointly solve the equations of filtration and mass transfer (Мироненко и Румынин, 1982). Therefore, only qualitative regularities of dense waters migration process have been studied on the basis of physical modeling data.

According to physical modeling data, the migration pattern as a whole is of a voluminous nature. What is more, the mass transfer process is strongly influenced, on the one hand, by the gravitational forces arising from differences in the densities of the infiltrating liquid and the carrier flow, and on the other – the effects of dispersion erosion of migrating solutions intrusion and further dispersion of components carried from its lateral surface by the flow of groundwater (Fig. 1 (Васильев и др., 1997)).

Gravitation most significantly affects the first stages of the migration process: intrusion of saline waters steeply plunges and quickly reaches the lower boundary of the formation. In this case, only the shape of the aureole changes, but the volume and mineralization of the waters within it practically do not differ from the initial ones. Influence of the natural flow in this case is not much appreciable. At later stages of migration, gravity also contributes to an increase in the rate of mineralized waters aureole advance along the formation base. Further migration leads to an increase in the size of saline waters aureole, and two zones are distinguished in its structure: the inner (core) represented by undiluted brines and the outer zone of the hydrodispersed erosion of the lateral boundaries of the nucleus, within which the content of salt components varies from the initial to the background values. The core of the intrusion is still flowing through fresh reservoir waters, and the velocity of its horizontal displacement is noticeably inferior to the rate of the transit flow. Such a ratio in the rates leads to the fact that the formation water, washing the body of mineralized waters from the sides, demolishes part of the substance that goes to the formation of the scattering zone of the components.

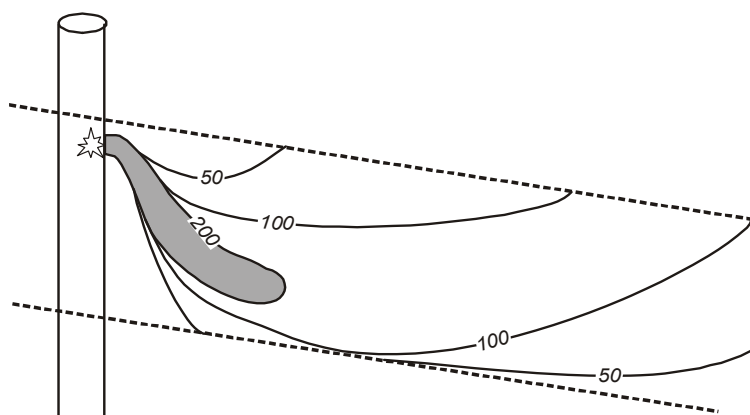


Fig. 1. Isolines of water (g/dm³) mineralization in the aquifer in mass transfer under conditions of density convection

The intensity of transverse scattering during the processes of density convection significantly exceeds the analogous characteristic of the spatial microdispersion of a physically inert tracer. Introduction of heavier liquid and the planned deformation of the flow lines of the filtration stream washing the intrusion lead to the appearance of an orthogonal component (with respect to the main transfer direction) of the filtration rate, which causes additional convective movement of the salts towards the peripheral zones of the halo. In the case of a one-time release, the core

of mineralized water gradually decreases in volume and disappears altogether, and the halo of salt components dispersion becomes wider.

Physical-chemical processes in aquifers can cause noticeable changes in the permeability of rocks. In particular, in sandy aquifers that have undergone the intrusion of saline waters, repeated replacement of the latter with fresh water can cause precipitation of compounds from the solution, pitting the pores and reducing permeability several times.

Under these conditions, we can only estimate the area of the contamination aureole. Taking into account the peculiarities of mineralized waters migration in the fresh water flow and sorption phenomena (especially with respect to petroleum products) and other physical and chemical processes, it is possible to estimate where mixing of different density water will bring the concentration of pollutants in the aquifer to MPC level.

To calculate the area of groundwater contamination during interlayer flows and leaks from production columns, we have adopted the average effective porosity (0,2) and power (30 m) of Bučak-Kaniv aquifer, and for formation fluids: leakage volume – 10 m³, salinity – 200 g/dm³, the oil content – 25%.

Calculations have showed that mineralized waters can cause local salinization of more than 300 m² of aquifer, and volley discharge into an aquifer of the same amount of water-oil mixture can lead to oil contamination of groundwater over a much larger area (up to 13,000 m²). The front of oil pollution can advance 1.0–1.5 km from the emergency well.

With a prolonged outflow of the water-oil mixture from the emergency production well, contamination of the underground waters of Buchak-Kaniv aquifer may be possible in a much larger area.

Conclusions. The results of factor analysis cannot be considered final as a limited number of data on the chemical composition of groundwater in Buchak-Kaniv aquifer have been studied. To confirm these results, one needs to enter additional data. When confirming the results using the same methodology, it is necessary to carry out research on the entire territory of DDV, especially within the old oil and oil and gas condensate fields. This will reveal unknown artificial hydrogeological windows and it will be possible to take measures to protect Buchak-Kaniv aquifer from pollution.

Список використаних джерел

- Варавва, К.Н., Вовк, И.Ф., Негода, Г.Н. (1977). Формирование подземных вод Днепровско-Донецкого бассейна. Киев: Наукова думка.
- Васильев, А.Н., Журавель, Н.Е., Клочко, П.В. (1997). Закономерности распределения техногенных загрязнителей в экосистеме кратера аварийной скважины Качановского нефтяного месторождения. *Доповіді НАН України*, 4, 184–188.
- Журавель, Н.Е., Васильев, А.Н., Клочко, П.В. и др. (1997). Критическая экосистема кратера аварийной скважины Качановского нефтяного месторождения. Харьков: Прапор.
- Журавель, Н.Е., Клочко, П.В., Самонова, Л.С. (1996). Проблемы охраны подземных вод в районе нефтегазовых месторождений на конечной стадии разработки (на примере Качановского месторождения). *Экологические аспекты загрязнения окружающей среды*, 2, 91–92.
- Иереског, К.Г., Клован, Д.И., Реймент, Р.А. (1980). Геологический факторный анализ. Ленинград: Недра.
- Камзіст, Ж.С., Шевченко, О.Л. (2009). Гідрогеологія України. Навчальний посібник. Київ: ІНКІОС.
- Левонюк, С.М. (2017). Зміни показників захищеності підземних вод бучацько-канівського водонасного комплексу центральної частини ДДАБ. *Матеріали IV наукової конференції "Гідрогеологія: наука, освіта, практика"*. Харків: Стиль-Іздат, 54–57.
- Мироненко, В.А., Румынин, В.Г. (1982). О расчетных моделях миграции в стратифицированных комплексах водоносных пород. *Записки ЛГИ*, 91, 5–20.
- Руденко, Ф. А. (1972). Гідрогеологія Української РСР. Київ: Вища школа.
- Сухно, И.Г. (1973). Химический состав каневско-бучацкого водонасного горизонта юго-восточной части Днепровского артезианского бассейна. *Материалы Харьковского отделения Географического общества Украины*, 12, 18–25.
- Чомко, Д.Ф. (2000). Визначення гідрогеологічних вікон в покривлі мергельно-крейдяного водонасного горизонту за гідрохімічними критеріями. *Геологічний журнал*, 4, 93–98.
- Чомко, Д.Ф., Кошляков, О.Е., Чомко, Ф.В., Удалов, І.В., Чомко, Р.Ф. (2017). Українсько-російсько-англійський словник-довідник гідрогеологічних термінів. Київ: ВПЦ "Київський університет".
- Чомко, Д.Ф., Решетов, І.К., Чомко, Ф.В., Чомко, Р.Ф. (2002). Многомерный статистический анализ при исследовании техногенного загрязнения подземных вод. *Геологічний журнал*, 2, 73–80.
- Чомко, Д.Ф., Решетов, І.К., Чомко, Ф.В., Чомко, Р.Ф. (2005). Применение факторного анализа при исследовании техногенного загрязнения

подземных вод. *Вестник Новочеркасского политехнического института*, 511, 153–164.

Чомко, Ф.В., Чомко, Д.Ф., Чомко, Т.В. (2003). Искусственные гидрогеологические окна – источник загрязнения бучацко-каневского водонасного горизонта на северо-востоке Украины. *Вісник Харківського національного університету*, 610, 18–24.

Чомко, Д.Ф., Решетов, І.К., Чомко, Ф.В., Чомко, Т.В. (2004). Попутно-промысловые воды нефтяных месторождений – источник загрязнения бучацко-каневского водонасного горизонта. *Матеріали науково-практичної конференції "Екологічні проблеми нафтогазового комплексу"*, Київ, 53–57.

Шестопалов, В.М., Богуский, А.С., Бублясь, В.Н. (2007). Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев: ИГН НАН Украины.

Шестопалов, В.М., Лялько, В.И., Огняник, Н.С. и др. (1991). Водобмен в гидрогеологических структурах Украины: Водобмен в нарушенных условиях. Киев: Наукова думка.

Шестопалов, В.М., Сухоребрий, А.А., Гудзенко, В.В. и др. (1989). Водобмен в гидрогеологических структурах Украины: Водобмен в естественных условиях. Київ: Наукова думка.

Reference

- Chomko, D.F. (2000). Vyznachennia hidroheolohichnykh vikon v pokrivi merhelno-kreidiano vodonosnoho horizontu za hidrokhimichnymy kryteriiamy. *Heolohichnyi zhurnal*, 4, 93–98. [in Ukrainian]
- Chomko, D.F., Koshliakov, O.Ye., Chomko, F.V., Udalov, I.V., Chomko, R.F. (2017). Ukrainsko-rosiisko-ahliiskiy slovnyk-dovidnyk hidroheolohichnykh terminiv. Kyiv: VPTs "Kyivskiy universytet". [in Ukrainian]
- Chomko, D.F., Reshetov, I.K., Chomko, F.V., Chomko, R.F. (2002). Mnogomernyy statisticheskij analiz pri issledovanii tekhnogennoho zagryazneniya podzemnykh vod. *Heolohichnyi zhurnal*, 2, 73–80. [in Russian]
- Chomko, D.F., Reshetov, I.K., Chomko, F.V., Chomko, R.F. (2005). Primenenie faktornogo analiza pri issledovanii tekhnogennoho zagryazneniya podzemnykh vod. *Vestnik Novocherkasskogo politekhnicheskogo instituta*, 511, 153–164. [in Russian]
- Chomko, D.F., Reshetov, I.K., Chomko, F.V., Chomko, T.V. (2004). Poputno-promyslovye vody neftyanykh mestorozhdenij – istochnik zagryazneniya buchaksko-kanevskogo vodonosnoho gorizonta. *Materialy naukovopraktychnoi konferentsii "Ekolohichni problemy naftogazovoho kompleksu"*, Kyiv, 53–57. [in Russian]
- Chomko, F.V., Chomko, D.F., Chomko, T.V. (2003). Iskustvennye gidrogeologicheskie okna – istochnik zagryazneniya buchaksko-kanevskogo vodonosnoho gorizonta na severo-vostoke Ukrainy. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho universytetu*, 610, 18–24. [in Russian]
- Jereskog, K.G., Klován, D.I., Rejment, R.A. (1980). Geologicheskij faktornyj analiz. Leningrad: Nedra. [in Russian]
- Kamzist, Zh.S., Shevchenko, O.L. (2009). Hidroheolohiia Ukrainy: navchalnyi posibnyk. Kyiv: INKOS. [in Ukrainian]
- Levoniyuk, S.M. (2017). Zminy pokaznykiv zachyshchenosti pidzemnykh vod buchatsko-kanivskoho vodonosnoho kompleksu tsentralnoi chastyny DDAB. *Materialy IV naukovoi konferentsii Hidroheolohiia: nauka, osvita, praktyka*, Kharkiv: Styl-Yzdat, 54–57. [in Ukrainian]
- Mironenko, V.A., Rumynin, V.G. (1982). O raschetnykh modelyakh migratsii v stratificirovannykh kompleksakh vodonosnykh porod. *Zapiski LGI*, 91, 5–20. [in Russian]
- Rudenko, F.A. (1972). Hidroheolohiia Ukrainskoi RSR. Kyiv: Vyscha shkola. [in Ukrainian]
- Shestopalov, V.M., Bogulskij, A.S., Bubyas', V.N. (2007). Otsenka zashishhennosti i uyzvimosti podzemnykh vod s uchetoм zon bystroj migratsii. Kyiv: IGN NAN Ukrainy. [in Russian]
- Shestopalov, V.M., Lyalko, V.I., Ognianik, N.S. et al. (1991). Vodoobmen v gidrogeologicheskikh strukturakh Ukrainy: Vodoobmen v narushennykh usloviyakh. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Shestopalov, V.M., Sukhorebryj, A.A., Gudzenko, V.V. et al. (1989). Vodoobmen v gidrogeologicheskikh strukturakh Ukrainy: Vodoobmen v estestvennykh usloviyakh. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Sukhno, I.G. (1973). Khimicheskij sostav kanevsko-buchakskogo vodonosnoho gorizonta yugo-vostochnoj chasti Dneprovskogo artziyanskogo bassejna. *Materialy Kharkovskogo otdeleniya Geograficheskogo obshhestva Ukrainy*, 12, 18–25. [in Russian]
- Varavva, K.N., Vovk, I.F., Negoda, G.N. (1977). Formirovanie podzemnykh vod Dneprovsko-Donetskogo bassejna. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian]
- Vasylev, A.N., Zhuravel, N.E., Klachko, P.V. (1997). Zakonomernosti raspredeleniya zagryaznitatelej v ekosisteme kratera avarijnoj skvazhiny Kachanovskogo neftyanogo mestorozhdeniya. *Dopovidi NAN Ukrainy*, 4, 184–188. [in Russian]
- Zhuravel, N.E., Klachko, P.V., Samonova, L.S. (1996). Problemy okhrany podzemnykh vod v rajone neftegazovykh mestorozhdenij na konechnoj stadii razrabotki (na primere Kachanovskogo mestorozhdeniya). *Ekologicheskie aspekty zagryazneniya okruzhayushhej sredy*, 2, 91–92. [in Russian]
- Zhuravel, N.E., Vasylev, A.N., Klachko, P.V. et al. (1997). Krytycheskaia ekosistema kratera avarijnoj skvazhiny Kachanovskogo neftyanogo mestorozhdeniya. Kharkov: Prapor. [in Russian]

Надійшло до редколегії 29.10.19

Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.
E-mail: Dimath@ukr.net,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;
Ф. Чомко, доц.,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
Факультет геології, географії, рекреації і туризму, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна;
Н. Черкашина, ст. викладач,
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
Факультет іноземних мов, пл. Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ШТУЧНІ ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ ВІКНА ЯК ДЖЕРЕЛА ЗАБРУДНЕННЯ БУЧАЦЬКО-КАНІВСЬКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ НА ПІВНІЧНОМУ СХОДІ УКРАЇНИ

Запропоновано новий метод визначення місця розташування штучних гідрогеологічних вікон у покрівлі та підшві водонасного горизонту. Як приклад розглянуто бучацько-канівський водонасний горизонт. Цей водонасний горизонт поширений у північно-східній частині України і є основним джерелом водопостачання для даного регіону. На наш погляд, забруднення бучацько-канівського водонасного горизонту може відбуватися насамперед через штучні гідрогеологічні вікна в його покрівлі та підшві. Для визначення місця розташування штучних гідрогеологічних вікон використано факторний аналіз хімічного складу пізмих вод водонасного горизонту. Факторний аналіз спочатку був проведений у місцях, де точно відомо про техногенне забруднення водонасного горизонту нафтопродуктами та супутними водами через штучні гідрогеологічні вікна (наприклад, нафтові або інші свердловини). У результаті було виявлено ряд впливових факторів з вагою більше 10 %. У подальшому в інших районах також проводився факторний аналіз з використанням такого ж набору компонентів хімічного складу пізмих вод. Збіг впливових факторів говорить про теоретичну можливість існування у даному районі штучного гідрогеологічного вікна.

Крім того, розглянуто різні варіанти поширення забрудників по площі горизонту.

Виявлення цих вікон важливе для визначення джерел забруднення водонасних горизонтів. Особливо привабливим буде використання цього методу в районах розташування старих (працюючих і закритих) родовищ нафтових, газових та нафтогазоконденсатних родовищ.

Ключові слова: бучацько-канівський водонасний горизонт, штучні гідрогеологічні вікна, забруднення водонасних горизонтів, факторний аналіз, нафтові і газові родовища.

Д. Чомко, канд. геол. наук, доц.
E-mail: Dimath@ukr.net,
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина;
Ф. Чомко, доц.,
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,
Факультет геологии, географии, рекреации и туризма, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина;
Н. Черкашина, ст. преподаватель,
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина,
Факультет иностранных языков, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

ИСКУССТВЕННЫЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОКНА КАК ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ БУЧАКСКО-КАНЕВСКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ УКРАИНЫ

Предложен новый метод определения местоположения искусственных гидрогеологических окон в кровле и подошве водонасного горизонта. Как пример рассмотрен бучакско-каневский водонасний горизонт. Этот водонасний горизонт распространен в северо-восточной части Украины и является основным источником водоснабжения для данного региона. На наш взгляд, загрязнение бучакско-каневского водонасного горизонта может происходить, прежде всего, через искусственные гидрогеологические окна в его кровле и подошве. Для определения местоположения искусственных гидрогеологических окон использован факторный анализ химического состава подземных вод водонасного горизонта. Анализ сначала был проведен в местах, где точно известно о техногенном загрязнении данного водонасного горизонта нефтепродуктами и попутно-пластовыми водами через искусственные гидрогеологические окна (например, нефтяные или другие скважины). В результате был выделен ряд влияющих факторов с удельным весом более 10 %. В дальнейшем в других районах также проводился факторный анализ с использованием такого же набора компонентов химического состава подземных вод. Совпадение влияющих факторов говорит о теоретической возможности существования в данном районе искусственного гидрогеологического окна.

Кроме того, рассмотрены различные варианты распространения загрязнителей по площади горизонта.

Выявление этих окон важно для определения источников загрязнения водонасных горизонтов. Особенно привлекательным будет использование этого метода в районах расположения старых (работающих и закрытых) месторождений нефтяных, газовых и нефтегазоконденсатных месторождений.

Ключевые слова: бучакско-каневский водонасний горизонт, искусственные гидрогеологические окна, загрязнение водонасных горизонтов, факторный анализ, нефтяные и газовые месторождения.

Наукове видання



ВІСНИК
КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
ГЕОЛОГІЯ
Випуск 2(89)

Комп'ютерна обробка статей – О. О. Козіонова

Оригінал-макет виготовлено Видавничо-поліграфічним центром "Київський університет"

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.

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.



Формат 60x84^{1/8}. Ум. друк. арк. 13,4. Наклад 300. Зам. № 220-9734.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл2.
Підписано до друку 30.06.2020

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_div.chief@univ.net.ua; redaktor@univ.net.ua
<http://vpc.univ.kiev.ua>
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02