

УДК 504+550+551+552+624

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

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

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

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

For scientists, professors, graduate and postgraduate students.

Journal is indexed in Web of Science, 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 Research Bib 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, 03022, Україна
☎ 380442597030, електронна адреса: geolvisnyk@ukr.net;
<http://www.geolvisnyk.univ.kiev.ua>

Затверджено

Вченою радою ННІ "Інститут геології"
30 грудня 2020 року (протокол № 10)

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

б-р Тараса Шевченка, 14, м. Київ, 01601, Україна;
☎ (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 і геоінформаційних досліджень.

Для викладачів, наукових співробітників, аспірантів і студентів.

Видання індексується в наукометричних базах даних Web of Science, Academic Resource Index Research Bib 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 Research Bib 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, Vasylkivska 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
December 30, 2020 (Minutes #10)

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,
Publishing and Polygraphic Center "Kyiv University", 2020
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

Решетник М., Гриценко В., Мартишин А. Ознаки бактеріальної природи вендських організмів <i>Nemiana Simplex</i>	6
--	---

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

Пушкар'юв О., Зубко О., Севрук І., Долін В. (мол.) Електроосмотичне фракціонування ізотопів водню у водних розчинах електролітів з використанням композитних протон-провідних мембран	11
Тіхлівець С. Варіативність фізичних і хімічних властивостей магнетиту та кварцу Північного району Криворізького басейну	17

ГЕОФІЗИКА

Вижва С., Онищук В., Онищук І., Рева М., Шабатура О. Методичні принципи геофізичних досліджень карстонебезпечних територій	24
Бондаренко М., Кулик В., Дмитренко О., Данилів С., Стасів О., Кармазенко В. Фізичне моделювання для вимірювання густини приповерхневих гірських порід при каротажі на кабелі та в процесі буріння	35
Меньшов О. Роль магнітних методів при дослідженні територій ущільнених порід-колекторів нафти і газу: постановка завдання	42
Садчиков А., Желасва Н., Токушева Ж., Пономарьова М. Застосування методів сейсмотомографії для вирішення різних завдань у гірничо-геологічному напрямі	50
Вижва С., Михалевич І. Комплексні критерії оцінки літологічних об'єктів для буріння пошукових свердловин на північному борті Дніпровсько-Донецької западини	55
Соболь В., Карпенко О. Нова модель проникності теригенних гранулярних колекторів на прикладі турнейських відкладів Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища Дніпровсько-Донецької западини	61

ГЕОЛОГІЯ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Калашник Г., Кузьмін А. Закономірності розміщення урановорудних об'єктів у Доно-Дніпровській потенційній урановорудній металогенічній провінції у зв'язку із глибинною будовою літосфери	67
Коржнев М., Курило М., Кошарна С. Підходи до планування сталого розвитку Криворізького залізорудного басейну на стадії пост-майнінгу	79
Алієва С. Методи прогнозу літолого-фізичної характеристики глибоко занурених перспективних нафтогазоносних покладів	88

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

Рокочинський А., Волк П., Токар Л., Шевченко О., Турченко В., Волк Л. Модуль дренажного стоку як визначальний показник ефективної дії дренажу	93
Ярошовець К., Ремезова О. Еколого-економічна ефективність використання торфових сорбентів для розв'язання екологічних проблем	103

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

Малицький Д., Мікесель Д. Визначення фокальних механізмів малих землетрусів шляхом обернення їхніх хвильових форм	108
---	-----

CONTENTS

GENERAL AND HISTORICAL GEOLOGY

Reshetnyk M., Gritsenko V., Martyshyn A. Evidence of the bacterial nature of the wendoman organisms <i>Nemiana Simplex</i>	6
--	---

MINERALOGY, GEOCHEMISTRY AND PETROGRAPHY

Pushkar'ov O., Zubko A., Sevruck I., Dolin V. (Jr.) Electro-osmotic fractionation of hydrogen isotopes in electrolytic solutions using composite proton-permeable membranes.....	11
Tikhliwets S. Variability of physical and chemical properties of magnetite and quartz of the Northern district of Kryvyi Rih basin.....	17

GEOFYSICS

Vyzhva S., Onyshchuk V., Onyshchuk I., Reva M., Shabatura O. Methodological principles of geophysical studies of karst dangerous territories	24
Bondarenko M., Kulyk V., Dmytrenko O., Danyliv S., Stasiv O., Karmazenko V. Physical modeling for density measurement of near-surface rocks, by wireline logging and logging while drilling.....	35
Menshov O. The role of magnetic methods in the study of areas of the tight oil and gas: introduction	42
Sadchikov A., Zhelaeva N., Tokusheva J., Ponomareva M. Application of seismotomography methods for solving various problems in the mining and geological direction	50
Vyzhva S., Mykhalevych I. Complex criteria of assessing lithological objects for drilling prospecting wells at the northern edge of the Dnieper-Donets Depression.....	55
Sobol V., Karpenko O. A new model of permeability of terrigenous granular reservoirs on the example of turney deposits of Yablunivske oil and gas condensate field of the Dnieper-Donets Basin	61

MINERAL RESOURCES

Kalashnyk G., Kuzmin A. Patterns of uranium-ore localization in the Dono-Dniprovsk potential uranium-ore metallogenic province in association with lithosphere's deep structure	67
Korzhnev M., Kurilo M., Kosharna S. Approaches to sustainable development of the Kryvyi Rih iron ore basin planning at the post-mining stage	79
Aliyeva S. Methods for predicting the lithological and facies characterization of deeply submerged prospective oil and gas deposits	88

HYDROGEOLOGY, ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL GEOLOGY

Rokochinskiy A., Volk P., Tokar L., Shevchenko O., Turchenyuk V., Volk L. Drainage module – an important indicator of the hydrological effect of the drainage.....	93
Yaroshovets E., Remezova E. Ecological and economic efficiency of the peat sorbents usage for solving of environmental problems.....	103

GEOLOGICAL INFORMATICS

Malytskyy D., Mikesell D. The determination of source mechanisms of small earthquakes by moment tensor inversion	108
--	-----

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Решетник М., Гриценко В., Мартишин А.

Признаки бактериальной природы вендских организмов *Nemiana Simplex*6

МИНЕРАЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И ПЕТРОГРАФИЯ

Пушкарев А., Зубко А., Севрук И., Долин В. (мл.)

Электроосмотическое фракционирование изотопов водорода в водных растворах электролитов
с использованием композитных протон-проводящих мембран.....11

Тихливец С.

Вариативность физических и химических свойств магнетита и кварца
Северного района Криворожского бассейна.....17

ГЕОФИЗИКА

Выжва С., Онищук В., Онищук И., Рева Н., Шабатура А.

Методические принципы геофизических исследований карстоопасных территорий24

Бондаренко М., Кулик В., Дмитренко А., Данылиев С., Стасив О., Кармазенко В.

физическое моделирование для измерения плотности приповерхностных горных пород
при каротаже на кабеле и в процессе бурения.....35

Меньшов А.

Роль магнитных методов при исследовании территорий уплотненных пород-коллекторов нефти и газа:
постановка задачи42

Садчиков А., Желаева Н., Токушева Ж., Пономарева М.

Применение методов сейсмотомографии для решения различных задач
в горно-геологическом направлении50

Выжва С., Михалевич И.

Комплексные критерии оценки литологических объектов для бурения поисковой скважины
на северном борту Днепроовско-Донецкой впадины55

Соболь В., Карпенко А.

Новая модель проницаемости терригенных гранулярных коллекторов на примере турнейских отложений
Яблунковского нефтегазоконденсатного месторождения Днепроовско-Донецкой впадины.....61

ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Калашник А., Кузьмин А.

Закономерности размещения урановорудных объектов в Доно-Днепроовской потенциальной урановорудной
металлогенической провинции в связи с глубинным строением литосферы67

Коржнев М., Курило М., Кошарна С.

Подходы к планированию устойчивого развития Криворожского железорудного бассейна
на стадии пост-майнинга79

Алиева С.

Методы прогноза литолого-фациальной характеристики глубоко погруженных
перспективно-нефтегазоносных отложений88

ГИДРОГЕОЛОГИЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЯ

Рокочинский А., Волк П., Токар Л., Шевченко А., Турченко В., Волк Л.

Модуль дренажного стока как определяющий показатель эффективного действия дренажа93

Ярошовец Е., Ремезова Е.

Эколого-экономическая эффективность использования торфяных сорбентов
для решения экологических проблем.....103

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА

Малицкий Д., Майкесел Д.

Определение фокальных механизмов малых землетрясений путем обращения их волновых форм.....108

ЗАГАЛЬНА ТА ІСТОРИЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 551.72:56.074

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.01>

М. Решетник, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: reshetnykmariya@gmail.com;
В. Гриценко, канд. геол.-мінералог. наук, ст. наук. співроб.
E-mail: favosites@ukr.net;
Національний науково-природничий музей НАН України,
вул. Б. Хмельницького, 15, м. Київ, 03103, Україна;
А. Мартишин, асп.,
E-mail: podolimirus@gmail.com;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ОЗНАКИ БАКТЕРІАЛЬНОЇ ПРИРОДИ ВЕНДСЬКИХ ОРГАНІЗМІВ *NEMIANA SIMPLEX*

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

Відбитки *Nemiana simplex* знайдено у вендських відкладах Придністров'я сто років тому. Вони містяться у верствах, для яких визначено вік 557 млн р. Усього місць з такими відбитками у світі чотирнадцять. *Nemiana simplex* є маркерами всіх відслонень ямпільських верств венду, тому для їхньої кореляції потрібен детальний аналіз інформації про ці організми. І до сьогодні точну їхню природу не визначено. Зазвичай ці фосилії мають вигляд опуклих лінзоподібних виступів на нижніх поверхнях пластів пісковика розмірами 1–40 мм. Їх вважали краплинами дощу, медузами та поліпами. Великі коливання розмірів і особливості просторового розташування говорять про їхню біологічну природу. Вони не мають жодних ознак ротового отвору та якихось інших морфологічних елементів целентерат. Є подібні до *Nemiana* відбитки *Beltanelliformis*. *Beltanelliformis* останнім часом визнано "бентосними колоніями ціанобактерій" за органічними петрифікованими плівками, що іноді зберігаються на їхніх відбитках. У відбитках *Nemiana* немає таких петрифікованих плівок на поверхні ядер, тому, спираючись на біохімічний аналіз, не можна з'ясувати, із чого вони склалися за життя (яку природу вони мали). *Nemiana* не схожа з *Beltanelliformis*: відмінними ознаками *Beltanelliformis* є відсутність яскраво виражених випуклих зліпків і концентричні складки по контуру плоских відбитків. Незважаючи на відмінності у формі відбитків, *Beltanelliformis* та *Nemiana* є найбільш схожими серед фосилій венду. Виходячи із того, що *Beltanelliformis* є відбитками ціанобактерій, можна припустити, що і *Nemiana* є теж ціанобактеріями. Розміри відбитків *Nemiana simplex* Палії близькі до розмірів сучасних кулеподібних колоній ціанобактерій *Nostoc prunum*. Великі колонії сучасних *Nostoc prunum* часто перебувають в оточенні колоній менших розмірів. Так само і у *Nemiana simplex* великі відбитки разом з меншими створюють "класстер", і з таких класстерів складаються цілі "поселення". Колонії *Nostoc* можуть з'являтися дуже близько від основної колонії, створюючи "бруньки", так само як і *Nemiana simplex*, що демонструють у відбитках таке "брунькування". Колонії ціанобактерій *Nostoc* поширені у прісних водоймах, рідше – у морях, *Nemiana* знаходять у відкладах величезних дельт, тобто теж у значно опріснених морських водах. Цілком вірогідно, що подібні до *Nostoc* форми існували давніше 550 млн років тому і збереглися до сьогодні у відбитках *Nemiana simplex* на ямпільських пісковицях. Відбитки *Nemiana simplex* трапляються на всіх сучасних континентах, що говорить про сполученість морських басейнів і про однорідні кліматичні умови на планеті у пізньовендську епоху. Відновлення "поселень" *Nemiana simplex*, що систематично засипались піщаними осадами, говорить про їхню високу здатність до виживання, варіативність розмноження.

Ключові слова: едіакарська система, венд Придністров'я, *Nemiana simplex*, колонії ціанобактерій.

Вступ. В останні роки наукова спільнота все більше уваги приділяє вивченню палеобіоти останнього періоду протерозою – едіакарію 541±1 – ~635 млн р. (*International Commission on Stratigraphy*, 2019). У Росії та в Україні пізній едіакарій корелюється з регіональним стратиграфічним підрозділом – вендом (*Гражданкин, 2016; Великанов, 2013*). У світі відомо 14 місцезнаходжень вендських відкладів: Австралія, Біле море, Південна Намібія, Поділля, Шотландія, Сибір, Китайський Тянь-Шань, Індія, Ньюфаундленд, Північно-західна Канада, США, Південна Америка та Урал (*Zakrevskaya, 2019*). Україна має на своїй території парастратотип верхнього венду: могиливі-подільську та канівську серії на Поділлі. Основне завдання сучасних стратиграфічних досліджень – кореляція відкладів венду по всьому світу. *Nemiana simplex* Палії (*Палій, 1976*) є стратиграфічним маркером могиливі-подільської серії, могиливіської світи, ямпільських верств (*Іванцов и др., 2015*). Саме з цими відбитками з верхньої межі ямпільських верств Е. Солдатенко були відібрані пісковики, що показали вік 556,78 млн р. (*Soldatenko et al., 2019*).

Постановка проблеми та огляд попередніх досліджень. *Nemiana simplex* Палії зазвичай мають вигляд опуклих овальних виступів на нижніх поверхнях пластів пісковика (так званий позитивний гіпорельєф) розмірами 0,1–4 см. Розрізнити більш дрібні відбитки складно, адже вони розташовані переважно у пісковицях, де розміри кварцових зерен породи часто перевищують 0,05 см. Перші дослідники вважали, що відбитки, відомі сьогодні як *Nemiana simplex*, є механогліфами, зокрема, їх розглядали

як заповнені піском "кратери", що утворені великими краплями дощу (*Красовський, 1916*). Складно уявити, що краплини могли бути такими різномірними і таких великих розмірів. У більш пізніх дослідженнях з'явилася гіпотеза про можливу належність відбитків целентерат (*Палій, 1976*). Але у целентерат є ротовий отвір, що якимось чином мав би проявитися у відбитках. У процесі детальних обстежень численних зразків жодних ознак того, що відбитки мають структурні елементи целентерат – чашки, умбрели, вінчики зі щупальців, не було виявлено.

Існують близькі до *Nemiana* відбитки *Beltanelliformis* (*Sokolov, 1972*). У публікації (*Ivantsov et al., 2014*) наведено характеристики, що вказують на їхню подібність. Іноді в глинистих породах на відбитках *Beltanelliformis* знаходять тонкі плівки петрифікованої органічної речовини. Це дало можливість порівняти органічні сполуки на цих відбитках зі сполуками на відбитках водоростей. І. Бобровським виявлено на відбитках *Beltanelliformis* значно більші концентрації гопану, що притаманно ціанобактеріям (*Bobrovskiy et al., 2018*). Отже, біохімічний аналіз показав, що *Beltanelliformis* є колоніями ціанобактерій.

Nemiana та *Beltanelliformis* мають низку суттєвих відмінностей (*Leonov, 2007*). Так, *Nemiana* знаходять переважно в пісковицях і значно рідше в алевролітах, це говорить про інші, ніж у *Beltanelliformis*, умови навколишнього середовища (чи середовища захоронення), адже для відбитків *Beltanelliformis* характерно знаходження у глинах, аргілітах чи вапняках. *Nemiana* мають у більшості випадків яскраво виражену випуклу форму, зрідка на

відбитках можна розрізнити різнонаправлені складки, що є результатом деформації під час захоронення. *Beltanelliformis* практично не мають випуклих зліпків і ключовою їхньою ознакою є концентричні складки по контуру плоских відбитків.

Ціль статті. Залишається актуальним питання, які істоти залишили відбитки *Nemiana simplex* Palij? Щоб вирішити це питання, поставлено завдання – виявити закономірності морфології відбитків *Nemiana simplex*, які могли б допомогти розшифрувати їхню природу.

Матеріали і методи. Матеріал, що став основою цих досліджень, відібрано переважно в кар'єрі на лівому березі р. Дністер поблизу греблі Дністровської ГЕС неподалік с. Бернашівка на протилежному березі від м. Новодністровськ (Вінницька обл.). Це місце описано в роботах (Мартишин, 2012; Dzik, 2015; Деревська, 2018; Гриценко, Решетник, 2019, а). У середині 80 рр. минулого сторіччя у кар'єрі було розкрито пісковики з відбитками фауни ямпільських верств. Завдяки розробці пісковиків вибухами утворилися товсті й тонкі плити розміром від 0,5 до кількох десятків квадратних метрів. На жаль, у процесі експлуатації виробки великі плити і блоки були розбиті та використані для укріплення берегів річища Дністра – водосховища Дністровської ГЕС-2, гребля якої розташована в кількох кілометрах нижче головної греблі. Тому для дослідження удалося відібрати 30 зразків у вигляді плиток, площа яких варіює від 0,02 м² до 0,4 м². На цих плитках нараховано більше двох з половиною тисяч відбитків. Середнє значення діаметра відбитку – 1,3 см; дисперсія – 0,5 см; коливання розмірів *Nemiana simplex* – від 0,8 до 1,8 см; ентропія – 3,16. У деяких плитках найбільш імовірно натрапити на відбитки діаметром 0,8–1 см, в інших діаметр відбитків коливається близько 1,3 см (Гриценко, Решетник, 2019б).

Дослідження відбитків давніх викопних організмів спирається на принцип актуалізму, що має пріоритетне значення для аналізу решток викопних організмів венду (едіакарію). Адже у відкладах цього часу є переважно відбитки і ядра тіл іхнофосилій, де майже відсутня органічна речовина (гопани, стерони у петрифікованих рештках). За принципом актуалізму підбираємо, які сучасні істоти можуть залишити відбитки морфологічно ідентичні знайденим у давніх відкладах, за аналогією припускаємо, що істота з минулого мала схожу будову та близьку природу. Просте "проектування" сучасних організмів у давноминулу екосистему дозволяє створити її модель у першому наближенні. У побудові більш точних уявлень варто добре усвідомлювати, що біосфера минулого була іншою, необхідно брати до уваги комплекс палеоекологічних факторів, дані щодо особливості середовища, ступінь розвитку способів живлення, розмноження та співіснування у тодішніх біоценозах.

Результати дослідження. Для екосистеми пізнього венду був характерний тотальний розвиток бактеріальних матів, сформованих різними видами ціанобактерій, про що свідчать його численні різновиди. Як зазначено вище, *Beltanelliformis* є відбитками бентосних колоній ціанобактерій. Тож, ідучи шляхом від найпростішого, розглянемо, чи можуть відбитки *Nemiana* теж належати колоніям ціанобактерій, адже венд був часом бурхливого розвитку цих організмів.

Розмір сучасних клітин ціанобактерій змінюється в діапазоні 10⁻⁴–10⁻² м. Такі розміри не можуть бути ідентифіковані у відбитках на грубозернистих пісковиках ямпільських верств Поділля. Однак колонії ціанобактерій можуть мати великі розміри та бути сферичної форми, як, наприклад, сучасні колонії ціанобактерій *Nostoc* (родини *Nostocaceae*), що в основному мають розміри 1–2 см (Baker, n.d.). За зовнішнім виглядом і розмірами

колонії сучасних *Nostoc* схожі на відбитки викопних *Nemiana* (рис. 1).



Рис. 1. Зображення приведені до однакового масштабу. Видно що розміри *Nemiana simplex* (б) близькі до розмірів колоній *Nostoc prunum* (а) (Baker, n.d.)

Колонії ціанобактерій *Nostoc* поширені в ґрунтах та у прісних водоймах, рідше у морях на невеликих глибинах. Відбитки *Nemiana* переважно сконцентровані в породах ямпільських верств, що вміщують піщані відклади із структурами "tidal sigmoid", притаманними мілководним відкладам літоралі та фації продельти. У кар'єрі, з якого відбиралися зразки ямпільських пісковиків, розробляється граніт, що становить виступ докембрійського фундаменту, який можливо був островом (Великанов, 1986). Осадкові верстви облямовують його з усіх боків. Отже, накопичення відкладів могло відбуватися на невеликих глибинах (метри, десятки метрів). За результатами геохімічного аналізу зразків глинистої фракції цих відкладів було показано, що вони утворилися в солонуватоводних умовах (Дегтярева та ін., 1972). *Nemiana* могли розселятися у прибережній території чи навколо островів. Крім того, відбитки *Nemiana simplex* часто трапляються в грубозернистих пісковиках, а грубі піщані відклади притаманні річковому алювію дельти. Отже, картина часу існування *Nemiana* могла виглядати таким чином: із краю тодішньої суші (теперішнього Українського щита) стікали потоки, що в Дністровській протоці формували величезні дельти, де й утворювалися сприятливі умови для розселення вендобіонтів. Наведені обставини наближають середовище існування імовірних ціанобактерій венду до параметрів сучасної обстановки, які комфортні для існування роду *Nostoc*.

Разом із тим, ямпільські відклади вміщують глауконіт (Деревська, 2008), який формується на великих глибинах. Це може говорити про насичення глауконітом під час значного пониження рельєфу території досліджень.

Оскільки *Nemiana* могли існувати в дельтах річок, на мілководді, то вони були в достатньо освітлених частинах водойм. Знайдено відбитки, де *Nemiana simplex* розташовані просто на алювіальних відкладах або на бактеріальних матах. Логічно припустити, що основним способом їхнього живлення був фотосинтез, що є ключовим у життєдіяльності ціанобактерій. Є відбитки *Nemiana*, що перекриті зверху "водоростево-бактеріальними матами", а це говорить, про те, що вони могли існувати якийсь час під бактеріальним покривом без світла або з недостатнім освітленням. Сучасні колонії

Nostoc prunum можуть рости в темряві та в анаеробних умовах, використовуючи для живлення органічні сполуки. Можливо припустити, що *Nemiana simplex* мали здатність існувати в подібних умовах. Така імовірна міксотрофність давала можливість колоніям "ціанобактерій" *Nemiana simplex* швидко заселяти мілководні літоральні та продельтові зони, що простягалися вздовж краю континенту.

Здатність жити в різних умовах сьогодні дозволяє ціанобактеріям бурхливо розмножуватися у водоймах. Проверстки з відбитками *Nemiana simplex* чергуються через 1–10 см. Отже, популяції змінювали одна одну доволі часто, що залежало від швидкості накопичення кожного ритму піщаного матеріалу (засипані колонії гинули). А це говорить про високу здатність до відновлення поселень. Якщо порівнювати вендські скам'янілості з колоніями *Nostoc*, то можна апроксимувати шлях їхнього розмноження на ціанобактерії венду. Є різновидність *Nostoc prunum*, колонії якої мають сферичний вигляд, їхні клітини з'єднані в нитки – трахоми. Коли шматок трахоми – гормогонія, що відривається по азотфіксуючих клітинах,

випадає з колонії, то він стає основою для формування нової колонії. Такі колонії можуть з'являтися безпосередньо біля основної колонії, створюючи своєрідні "бруньки" (рис. 2, а). Серед зібраних нами матеріалів є відбитки *Nemiana simplex*, які, на нашу думку, можуть демонструвати результат такого "брунькування" (рис. 2, б-г). У клітинах гормогоній можуть з'являтися вакуолі з газом, це допомагає їм спливати та переміщуватися у водних потоках і заселяти значні площі (рис. 3, а). Відбитки поселень *Nemiana simplex* зустрічаються на площах кілька квадратних метрів, що може свідчити про аналогічний спосіб їхнього поширення. Судячи з морфології скам'янілостей, ці імовірні колонії ціанобактерій були серед перших істот, які заселяли поверхню морського дна. Гормогонії, що опинились неподалік "материнської" колонії, можуть утворювати ланцюжки з колоній або нові "кластери" колоній (рис. 3, б). Поселення в яких великі особини перебувають в оточенні колоній менших розмірів, є типовим для кластерів сучасних *Nostoc prunum* (рис. 3, в); подібну картину ми бачимо і у відбитках *Nemiana simplex* (рис. 3, г).

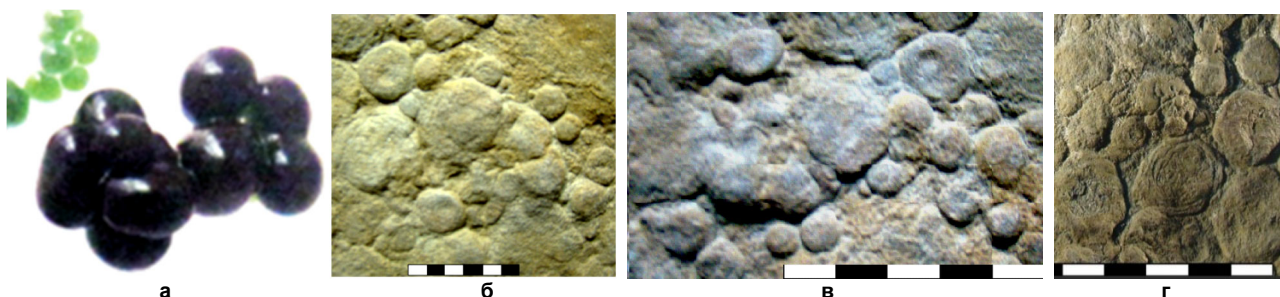


Рис. 2. Колонії *Nostoc prunum* у вигляді "бруньок" (а) (Егорова, 2019) і вірогідне "брунькування" у відбитках *Nemiana simplex* (б-г), (поділкі на масштабній лінійці 10 мм)

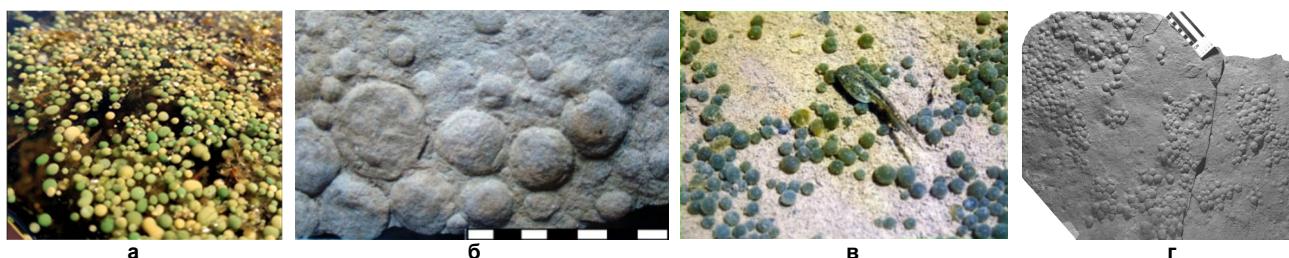


Рис. 3. Відбитки *Nemiana simplex* ніби ланцюжки оточують і поширюються від найбільшого відбитку:
а – *Nostoc* з вакуолями; б – кілька кластерів *Nemiana simplex* на одній плиті;
в – кластер сучасних колоній ціанобактерій *Nostoc prunum* в прісноводній водоймі (Baker, n.d.);
г – фрагмент кластера *Nemiana simplex* (поділкі на масштабній лінійці 10 мм).

Характер розташування різних відбитків поселень *Nemiana simplex* – вірогідних колоній ціанобактерій венду, є типовим для колоній сучасних *Nostoc prunum*. На відбитках викопних вендських *Nemiana* зберігся макроефект на рівні поселення (колонії) від тих процесів розмноження, що відбуваються на мікрорівні в ціанобактерій. Завдяки таким простим, але ефективним стратегіям *Nemiana* розселилися по багатьох палеобасейнах і проіснували рекордно довгий час.

Висновки. Цілком припустимо, що відбитки *Nemiana simplex* сформовані сферичними колоніями ціанобактерій. Їхні розміри та форма дуже схожі на колонії ціанобактерії *Nostoc*.

Грубозернистий пісок у ямпільських пісковиках свідчить про його продельтову седиментацію, отже, і *Nemiana*, що жили в цих пісках, могли бути жителями дельти і прибережних мілководних ділянок моря. Тобто ці організми могли бути подібними до *Nostoc*, які сьогодні поширені в прісноводних водоймах. Також невеликі глибини

існування *Nemiana* можуть бути зумовлені тим, що вони теж, як і *Nostoc*, були фотосинтезуючими організмами.

Аналіз положення та структури скупчень відбитків *Nemiana* свідчить про такі способи розростання колоній, як брунькування, кластерування та утворення ланцюжків.

Подяка. Авторі щиро вдячні керівництву ННПМ НАН України та ННІ "Інститут геології" Київського національного університету імені Тараса Шевченка за сприяння в проведенні польових робіт і камеральних досліджень. Висловлюємо вдячність керівникам і співробітникам Дністровської ГАЕС за дозвіл працювати в кар'єрі.

Список використаних джерел

- Веліканов, В.Я. (1986). Про тектонічну природу Бернашівського підняття (Середнє Придністров'я). *Короткі наукові повідомлення*, 23, 123–127.
Веліканов, В.Я., Мельничук, В.Г. (2013). Вендська система. У: П.Ф. Гожик (ред.). Стратиграфія верхнього протерозою та мезозою України. К.: Логос, 49–145.
Гражданкин, Д.В. (2016). На пути к ярусному расчленению эдиакария и место венда в международной стратиграфической шкале. *Материалы Межведомственного рабочего совещания "Общая стратиграфическая шкала и методические проблемы разработки региональных стратиграфических шкал России"*, 17–20 окт. 2016, СПб., 51–53.

Гриценко, В.П., Решетник, М.М. (2019, а). Геологічні музеї просто неба та ідея створення такого музею в кар'єрі біля с. Бернашівка (Поділля). *Праці наукової конференції "Природничі музеї в Україні: становлення та перспективи розвитку"*, 7–8 жовт. 2019, Київ, 153–158.

Гриценко, В.П., Решетник, М.М. (2019б). Особливості відбитків фауни венду в ямпільських пісковицях с. Бернашівка Вінницької області. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Розвиток промисловості та суспільства"*, 22–24 трав. 2019, Кривий Ріг, 30–35.

Деревська, К.І. (2008). Палеогеотермальний режим літогенезу та гіпогенного рудоутворення в межах балтійсько-дністровської перикратонної зони прогинів у рифей-фанерозой: автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 04.00.27. Київ.

Деревська, К., Руденко, К., Гриценко, В., Сільченко, Г. (2018). Перспективи організації мережі Геологічних музеїв "просто неба" Дністрянщини. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції "Геотуризм: практика і досвід"*, 26–28 квіт. 2018, Львів, 236–237.

Дехтярева, Л.В., Заика-Новацкий, В.С., Нечаев, С.В. и др. (1972). Разработка критериев поисков флюорита и свинцово-цинкового оруднения в верхнепротерозойско-нижнепалеозойских формациях западного склона Украинского щита в связи с геологической съемкой масштаба 1 : 50000. *Отчет. Фонды Правобережной ГРЭ ПГО "Севукргеология"*.

Егорова, И.Н., Шамбуева, Г.С., Шергина, О.В., Шинен, Н.К. (2019). Экологии *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) из Южной Сибири и Монголии. *Сибирский лесной журнал*, 1, 16–29.

Иванцов, А.Ю., Гриценко, В.П., Палий, В.М., Великанов, В.А., Константиненко, Л.И., Менасова, А.Ш., Федонки, М.А., Закревская, М.А., Сережников, Е.А. (2015). Макрофоссилии верхнего венда Восточной Европы. Среднее Приднепровье и Волынь. Москва : ПИН РАН.

Красовский, А.В. (1916). Из геологических наблюдений в Подольской губернии (предварительное сообщение). *Зап. Имп. о-ва любителей естествоис., антроп. и этн. Геол. отд.*, 3, 22–27.

Мартиншин, А.О. (2012). Едіакарська фауна ямпільських пісковиць венду Поділля. *Геолог України*, 40(4), 97–104.

Палий, В.М. (1976). Остатки бесскелетной фауны и следы жизнедеятельности из отложений верхнего докембрия и нижнего кембрия Подолии. В: А.Б. Ивановский, И.Б. Иванов (ред.). Палеонтология и стратиграфия верхнего докембрия и нижнего палеозоя юго-запада Восточно-Европейской платформы. К. : Наук. думка, 63–77.

Соколов, Б.С. (1972). Докембрийская биосфера в свете палеонтологических данных // *Вестник АН СССР*, 8, 48–54.

Baker, A.L. (n.d.). Sait "Phytoplankton key". University of New Hampshire. *Nostoc* (Cyanophyceae). Retrieved from http://cfb.unh.edu/phycokey/Choices/Cyanobacteria/cyano_filaments/cyano_unbranched_fil/untapered_filaments/heterocysts/vis_sheath/NOSTOC/Nostoc_image_page.html

Bobrovskiy, I., Hope, J.-M., Krasnova, A., Ivantsov, A., Brocks, J.-J. (2018). Molecular fossils from organically preserved Ediacara biota reveal cyanobacterial origin for Beltanelliformis. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 437–440. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0438-6>.

Dzik, J., Martyshyn, A. (2015). Taphonomy of the Ediacaran Podolimirus and associated dipleurozoans from the Vendian of Ukraine. *Precambrian Research*, 269, 139–146.

Ivantsov, A.Y., Grytsenko, V.P., Konstantynenko, L.I., Zakrevskaya, M.A. (2014). Revision of the problematic Vendia macrofossils *Beltanelliformis* (=Beltanelloides, Nemiana). *Paleontological Journal*, 48 (13), 1–26.

Leonov, M.V. (2007). Comparative taphonomy of Vendian genera Beltanelloides and Nemiana: taxonomy and lifestyle. In: P. Vickers, R.P. Komarower (Eds.). The Rise and Fall of the Ediacaran Biota. London: Published by The Geological Society, 259–267.

Sait "International Commission on Stratigraphy". (2019, may). International Chronostratigraphic Chart. Retrieved from <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2019-05.jpg>

Seilacher, A. (1992). Vendobionta and Psammocorallia: Lost constructions of Precambrian evolution. *Journal Geological Society*, 149, 607–613.

Soldatenko, Y., El Albani, A., Ruzina, M., Fontaine, C., Nesterovsky, V., Paquette, J.-L. et al. (2019). Precise U–Pb age constraints on the Ediacaran biota in Podolia, East European Platform, Ukraine. *Scientific Report*, 9, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38448-9>

Zakrevskaya, M. (2019). Paleobiogeographic Analysis of the Assemblages of Late Vendian Macrofossils. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 5(27), 603–611.

References

Baker, A.L. (n.d.). Sait "Phytoplankton key". University of New Hampshire. *Nostoc* (Cyanophyceae). Retrieved from http://cfb.unh.edu/phycokey/Choices/Cyanobacteria/cyano_filaments/cyano_unbranched_fil/untapered_filaments/heterocysts/vis_sheath/NOSTOC/Nostoc_image_page.html

Bobrovskiy, I., Hope, J.-M., Krasnova, A., Ivantsov, A., Brocks, J.-J. (2018). Molecular fossils from organically preserved Ediacara biota reveal

cyanobacterial origin for Beltanelliformis. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 437–440. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0438-6>.

Dekhtyareva, L.V., Zaika-Novatskiy, V.S., Nechayev, S.V. i dr. (1972). Razrabotka kriteriyev poiska flyuorita i svintsovo-tsinkovogo orudena v verkhneproterozoyso-kizhnepaleozoysskikh formakh zapadnogo sklona Ukrainskogo shchita v svyazi s geologicheskoy s'yemkoy masshtaba 1 : 50000. *Otchet. Fondy Pravoberezhnoy GRE PGO "Sevukргеolgiya"*. [in Russian]

Derevska, K., Rudenko, K., Hrytsenko, V., Silchenko, H. (2018). Perspektyvy orhanizatsiyi merezhi Heolohichnykh muzeyiv "prосто neba" Dnistrianshchyny. *Materialy III mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Heoturizm: praktyka i dosvid"*, April 26–28, 2018, Lviv, 236–237. [in Ukrainian]

Derevska, K.I. (2008). Palaeothermal conditions of Riphean to Phanerozoic lithogenesis and ore formation within the Baltic-Dniester pericratonic belt. *Extended abstract of Doctor's thesis (Geol.)*: 04.00.27. Kyiv. [in Ukrainian]

Dzik, J., Martyshyn, A. (2015). Taphonomy of the Ediacaran Podolimirus and associated dipleurozoans from the Vendian of Ukraine. *Precambrian Research*, 269, 139–146.

Ehorova, Y.N., Shambueva, H.S., Sherhyna, O.V., Shynen, N.K. (2019). Ékolohyy *Nostoc commune* (Cyanoprokaryota) yz Yuzhnoy Sybyry y Monholyy. *Sybrskyy lesnoy zhurnal*, 1, 16–29. [in Russian]

Hrazhdankyn, D.V. (2016). Na puty k yarusnomu raschlenenyyu édyakanyya y mesto venda v mezhdunarodnoy stratyhrayfcheskoy shkale. *Materyaly Mezhdunarodnogo rabocheho soveshchanyya "Obshchaya stratyhrayfcheskaya shkala y metodycheskye problemy razrabotky rehyonal'nykh stratyhrayfcheskykh shkal Rossyy"*, October 17–20, 2016, Sankt-Peterburh, 51–53. [in Russian]

Hrytsenko, V.P., Reshetnyk, M.M. (2019a). Heolohichni muzeyi просто neba ta ideya stvorenniya takoho muzeyu y karyeri bilya s. Bernashivka (Podillya). *Pratsi naukovoї konferentsiyi "Pryrodnychi muzeyi v Ukraini: stanovlennya ta perspektyvy rozvytku"*, October 7–8, 2019, Kyiv, 153–158. [in Ukrainian]

Hrytsenko, V.P., Reshetnyk, M.M. (2019b). Osoblyvosti vidbytkiv fauny vendu v yampil's'kykh piskovykakh s. Bernashivka Vinnyts'koyi oblasti. *Materialy mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Rozvytok promyslovosti ta suspilstva"*, may 22–24, 2019, Kryvyi Rih, 30–35. [in Ukrainian]

Ivantsov, A.Y., Grytsenko, V.P., Konstantynenko, L.I., Zakrevskaya, M.A. (2014). Revision of the problematic Vendia macrofossils *Beltanelliformis* (=Beltanelloides, Nemiana). *Paleontological Journal*, 48 (13), 1–26.

Ivantsov, A.YU., Hrytsenko, V.P., Paliy, V.M., Velykanov, V.A., Konstantynenko, L.Y., Menasova, A.SH., Fedonky, M.A., Zakrevskaya, M.A., Serezhnykova, E.A. (2015). Makrofossyliy verkhneho venda Vostochnoy Evropy. Srednee Prydnestrov'e y Volyn. Moskva: PYN RAN. [in Russian]

Krasovskyy, A.V. (1916). Yz heolohycheskykh nablyudeny y Podolskoy hubernyy (predvartelnoe soobshchenye). *Зап. Ymp. o-va lyubiteley estestv., antrop. y étn. Heol. otd.*, 3, 22–27. [in Russian]

Leonov, M.V. (2007). Comparative taphonomy of Vendian genera Beltanelloides and Nemiana: taxonomy and lifestyle. In: P. Vickers, R.P. Komarower (Eds.). The Rise and Fall of the Ediacaran Biota. London: Published by The Geological Society, 259–267.

Martyshyn, A.O. (2012). Ediakarska fauna yampil'skykh piskovykiv vendu Podillya. *Heoloh Ukrayiny*, 40(4), 97–104. [in Ukrainian]

Paliy, V.M. (1976). Ostatky besskeletnoy fauny y sledy zhynzneyatel'nosty yz otlozhenyy verkhneho dokembryya y nyzhnego kembryya Podoly. In: A.B. Yvanovskyy, Y.B. Yvanov (Eds.). Paleontolohyya y statyhrayfyya verkhneho dokembryya y nyzhnego paleozoya yuho-zapada Vostochno-Evropeyskoy platformy. Kyev: Naukova dumka, 63–77. [in Russian]

Sait "International Commission on Stratigraphy". (2019, may). International Chronostratigraphic Chart. Retrieved from <http://www.stratigraphy.org/ICSChart/ChronostratChart2019-05.jpg>

Seilacher, A. (1992). Vendobionta and Psammocorallia: Lost constructions of Precambrian evolution. *Journal Geological Society*, 149, 607–613.

Sokolov, B.S. (1972). Dokembryyskaya byosfera v svete paleontolohycheskykh dannyykh. *Vestnyk AN SSSR*, 8, 48–54. [in Russian]

Soldatenko, Y., El Albani, A., Ruzina, M., Fontaine, C., Nesterovsky, V., Paquette, J.-L. et al. (2019). Precise U–Pb age constraints on the Ediacaran biota in Podolia, East European Platform, Ukraine. *Scientific Report*, 9, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-38448-9>

Velikanov, V.Ya. (1986). Pro tektonichnu pryrodu Bernashivskoho pidnyattya (Serednye Prydnistroya). *Korotki naukovy povidomlennya*, 23, 123–127. [in Ukrainian]

Velikanov, V.YA., Melnychuk, V.H. (2013). Vendska sistema. In: P.F. Hozhyk (Eds.). *Stratyhrayfyya verkhneho proterozoyu ta mezozoyu Ukrayiny*. Kyiv: Logos, 49–145. [in Ukrainian]

Zakrevskaya, M. (2019). Paleobiogeographic Analysis of the Assemblages of Late Vendian Macrofossils. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 5(27), 603–611.

Надійшла до редакції 10.11.2020

M. Reshetnyk, PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: reshetnykmariya@gmail.com;
V. Gritsenko, PhD (Geol.-Min.), Head of Department of Geology,
E-mail: favosites@ukr.net;
The National Museum of Natural History at the NAS of Ukraine,
15 Khmel'nitsky Str., Kyiv, 01601, Ukraine;
A. Martyshyn, PhD Student,
E-mail: podolimirus@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022 Ukraine

EVIDENCE OF THE BACTERIAL NATURE OF THE WENDOMAN ORGANISMS NEMIANA SIMPLEX

Nemiana simplex were found in Vendian deposits of Transnistria a hundred years ago. They are present in layers with determined age of 557 million. There are fourteen places with such fossils in the world. *Nemiana simplex* are the markers of all deposits of the Yampilian layers of the Vendian. We need to take a closer look at the *Nemiana simplex* analysis, as their exact nature has not been determined so far. They were considered to be raindrops, jellyfish or polyps, which is not justified. The large fluctuations in their size, and the peculiarities of their location relative to each other, indicate their biological nature. Usually, these fossils have the appearance of convex lenticular projections on the lower surfaces of sandstone layers 1-40 mm in size. They do not have any signs of the mouth opening and any other structural elements of the intestinal cavity. There are similar *Nemiana* prints of *Beltanella* and *Beltanelliformis*. *Beltanelliformis* has recently been recognized as "benthic colonies of cyanobacteria" by organic petrified films, sometimes preserved on their prints. *Nemiana*'s prints do not contain such petrified films on the surface of the nuclei, so one cannot ascertain from biochemical analysis what they were during lifetime. *Nemiana* is not similar to *Beltanelliformis*: the distinctive features of *Beltanelliformis* are the absence of pronounced convex casts and concentric folds along the contour of flat prints. Although there are differences in the shape of the prints, *Beltanelliformis* and *Nemiana* are the most similar among the Vendian fossils. Given that *Beltanelliformis* are reflections of cyanodactinians, we can assume that *Nemiana* is also a cyanobacterium. The print sizes of *Nemiana simplex* Palij are close to the size of modern spherical colonies of cyanobacteria *Nostoc prunum*. Large colonies of modern *Nostoc prunum* are often surrounded by smaller colonies, and in *Nemiana simplex* prints large prints together with smaller ones create a "cluster". Such clusters consist of entire "settlements". *Nostoc* colonies can appear very close to the main colony, creating "kidneys", with *Nemiana simplex* prints showing such "buds". Colonies of *Nostoc* cyanobacteria are widespread in fresh water, less often in the seas; *Nemiana* is found in deposits of huge deltas, that is, also in significantly desalinated seawater. It is likely that such *Nostoc* forms existed earlier than 550 million years ago and are still preserved in the *Nemiana simplex* prints on the Yampilian sandstones. *Nemiana simplex* prints are found on all modern continents, which indicates the conjugacy of the sea basins and the homogeneous climatic conditions on the planet during the Upper Vendee. The restoration of "settlements" of *Nemiana simplex*, which were systematically covered with sandy sediments, indicates their high ability to survive and the variability of reproduction.

Keywords: Precambrian, Vendian, Ediacaran biota, Vendian Transnistria, *Nemiana simplex*, colonies of cyanobacteria, reproduction of cyanobacteria, photosynthesis of cyanobacteria.

М. Решетник, канд. геол. наук, ст. науч. сотруд.,
E-mail: reshetnykmariya@gmail.com;
В. Гриценко, канд. геол.-минералог. наук, ст. науч. сотруд.,
E-mail: favosites@ukr.net,
Национальный научно-природоведческий музей НАН Украины,
ул. Б. Хмельницкого, 15, г. Киев, 03103, Украина;
А. Мартишин, асп.,
E-mail: podolimirus@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, УНИ "Институт геологии",
ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ПРИЗНАКИ БАКТЕРИАЛЬНОЙ ПРИРОДЫ ВЕНДСКИХ ОРГАНИЗМОВ NEMIANA SIMPLEX

Отпечатки *Nemiana simplex* найдены в вендских отложениях Приднестровья сто лет назад. Они находятся в слоях, для которых определен возраст 557 млн лет. Всего мест с такими отпечатками в мире четырнадцать. *Nemiana simplex* являются маркерами всех отложений ямпольских слоев венда, поэтому для их корреляции необходим более детальный анализ информации об этих организмах. До сих пор точная их природа не определена. Обычно эти фоссилии имеют вид выпуклых линзовидных выступов на нижних поверхностях слоев песчаника размерами 1–40 мм. Их считали каплями дождя, медузами и полипами. Но большие колебания их размеров и особенности их расположения друг по отношению к другу говорят об их биологической природе. Кроме того, они не имеют никаких признаков ротового отверстия и каких-то других структурных элементов кишечнополостных. Есть подобные *Nemiana* отпечатки *Beltanella* и *Beltanelliformis*. *Beltanelliformis* в последнее время признаны бентосными колониями цианобактерий по органическому петрифицированному пленкам, иногда сохранившимся на их отпечатках. В отпечатках *Nemiana* нет таких петрифицированным пленок на поверхности ядер, потому, опираясь на биохимический анализ, нельзя выяснить, из чего они состояли при жизни. Отличительными признаками *Beltanelliformis* является отсутствие ярко выраженных выпуклых слепков и концентрические складки по контуру плоских отпечатков. Но, хотя и есть различия в форме отпечатков, однако *Beltanelliformis* и *Nemiana* являются наиболее похожими среди фоссилий венда. Исходя из того, что *Beltanelliformis* являются отражениями цианодактрий, можно предположить, что и *Nemiana* тоже цианобактерии. Размеры отпечатков *Nemiana simplex* Palij близки к размерам современных шарообразных колоний цианобактерий *Nostoc prunum*. Большие колонии современных *Nostoc prunum* часто находятся в окружении колоний меньших размеров, и в отпечатках *Nemiana simplex* большие отпечатки вместе с меньшими создают "кластер", из таких кластеров состоят целые "поселения". Колонии *Nostoc* могут появляться очень близко от основной колонии, создавая "почки", есть отпечатки *Nemiana simplex*, демонстрирующие такое "почкование". Колонии цианобактерий *Nostoc* распространены в пресных водоемах, реже в морях, *Nemiana* находят в отложениях огромных дельт, то есть тоже в значительно опресненных морских водах. Вполне вероятно, что подобные *Nostoc* формы существовали ранее 550 млн лет назад и сохранились до сих пор в отпечатках *Nemiana simplex*. Отпечатки *Nemiana simplex* встречаются на всех современных континентах, что говорит о сопряженности морских бассейнов и об однородных климатических условиях на планете во времена верхнего венда. Восстановление "поселений" *Nemiana simplex*, которые систематически засыпались песчаными осадками, говорит об их высокой способности к выживанию, вариативности размножения.

Ключевые слова: эдиакарий, Венд Приднестровья, *Nemiana simplex*, колонии цианобактерий.

МІНЕРАЛОГІЯ, ГЕОХІМІЯ ТА ПЕТРОГРАФІЯ

УДК 544.638.2+544.582.2+544.032.52
DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.02>

О. Пушкар'єв, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: pushkarevigns@gmail.com,
ORCID ID 0000-0002-4382-8620;

О. Зубко, наук. співроб.,
E-mail: zhubko@rambler.ru,
ORCID ID 0000-0002-2521-8087;

І. Севрук, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: Irina_mihalovna@ukr.net;

В. Долін (мол.), мол. наук. співроб.,
E-mail: dolinvitaliy@gmail.com,
ORCID ID 0000-0002-1962-9277;

ДУ "Інститут геохімії навколишнього середовища НАН України",
Пр. Акад. Палладіна, 34, а, м. Київ-142, 03680, Україна

ЕЛЕКТРООСМОТИЧНЕ ФРАКЦІОНУВАННЯ ІЗОТОПІВ ВОДНЮ У ВОДНИХ РОЗЧИНАХ ЕЛЕКТРОЛІТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПОЗИТНИХ ПРОТОН-ПРОВІДНИХ МЕМБРАН

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

На основі аналізу особливостей електроосмотичних процесів, що реалізуються у протон-провідних мембранах оцінено можливість фракціонування ізоотопів водню в електролітах, утворених з використанням тритійованої води (НТО). При взаємодії розчину з мембранами в їхніх каналах відбувається поляризація та часткова дисоціація молекул електроліту. У молекулах води при заміні протію на важкий ізоотоп водню збільшується енергія розриву водневих зв'язків, і процес їхньої дисоціації відбувається переважно за схемою: $\text{НТО} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{TO}^-$. Частина вивільнених протонів може приєднуватися до молекул води з утворенням іона H_3O^+ . Іони H_3O^+ і TO^- більш рухливі, ніж інші однозарядні іони. Головною характеристикою, яка визначає придатність електроосмотичних мембран до фракціонування ізоотопів водню, є їхня протонна провідність. Вивільнені протони мають аномально високу рухливість завдяки малому розміру, тунельному та естафетному переміщенню через водневі зв'язки між сусідніми полярними групами в каналах протон-провідних мембран. Для забезпечення високої протонної провідності в порах і каналах мембран закріплюють речовини-модифікатори, що містять групи: $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}$, $-\text{SH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$, кислоти та оксиди, які містять поверхневі протон-провідні групи. Для створення протон-провідних мембран можливо використання поверхнево-модифікованого β -глинозему ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H}_3\text{O}^+)$) та протонованого (H_3O^+) монтморилоніту з іонною провідністю ($5 \times 10^{-3} - 4 \times 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}^{-1}$). Найбільш ефективними є поверхневі модифікатори з негативно зарядженими сульфоновими групами. Накладання зовнішнього електричного поля призводить до руху іонів в електроліті, що зумовлює перерозподіл ізоотопного співвідношення в прианодному та катодному просторах.

Ключові слова: ізоотопи водню, електроосмотичні процеси, електроліт, фракціонування, мембрани, протонна провідність.

Вступ. Функціонування об'єктів ядерно-паливного комплексу постійно супроводжується забрудненням рідких промислових скидів тритієм. Проблема запобігання такому забрудненню ускладнюється тим, що забруднювальний компонент (тритій) є складовою частиною водної транспортної субстанції. Не менш важливими проблемами є необхідність очищення від тритію дейтерієвої води, яка використовується в ядерній промисловості та підвищення ефективності технологій концентрування тритію з метою його подальшого використання. Одним із можливих підходів до розв'язання цих проблем є фракціонування ізоотопів водню у водних розчинах.

Відомо, що найбільш поширеними в природі ізоотопами водню є ^1H – протій, ^2H – дейтерій (D) та ^3H – тритій (T). Зростання енергії зв'язку в ізоотопних водневих сполуках від протію до тритію великою мірою пояснює низку ізоотопних ефектів. Ізоотопні ефекти найчастіше обумовлені відмінностями мас ядер ізоотопів (гравітаційний ізоотопний ефект), але можуть бути зумовлені також іншими ізоотопними ефектами І роду (електромагнітним, термодинамічним, кінетичним, дифузійним, адсорбційним тощо) (Бердоносів, 1990). Ізоотопні ефекти І роду виявляються тим сильніше, чим більша різниця мас ізоотопів, тобто з ростом атомної маси елементів, ізоотопний ефект зменшується. Для плеяд ізоотопів зі зростанням маси спостерігається збільшення частоти коливань та відповідно збільшення енергії зв'язку в молекулі, що викликає накопичення важких ізоотопів у молекулах з більшою енергією зв'язку. Найбільший ефект спостерігається для сполук ізоотопів водню, при цьому константи рівноваги реакцій ізоотопного фракціонування істотно відрізняються від 1.

Метою роботи є встановлення можливості фракціонування ізоотопів водню в електролітах, утворених з використанням тритійованої води (НТО) на основі аналізу особливостей електроосмотичних процесів, що реалізуються у протон-провідних мембранах.

Теоретичні основи електроосмотичного фракціонування ізоотопів водню.

Зміни енергетичних рівнів при ізоотопному заміщенні зумовлюють зміну термодинамічних властивостей ізоотопних молекул, таких як теплоємність, теплопровідність, теплота випаровування і топлення, температура топлення, кипіння тощо. Термодинамічна нерівноцінність ізоотопних сполук веде до переважної адсорбції однієї з ізоотопних форм на сорбенті. Крім того, термодинамічна нерівноцінність вихідних ізоотопних сполук у сполученні з аналогічною нерівноцінністю перехідних станів (активних комплексів) у хімічних реакціях зумовлює різну швидкість хімічних реакцій ізоотопних сполук (кінетичний ізоотопний ефект).

Кінетичний ізоотопний ефект обумовлюється різною швидкістю реакцій ізоотопних молекул, оскільки в хімічній реакції беруть участь тільки ті молекули, які досягли енергії активації. Частка молекул, які досягають швидкості, за якої можливо подолати енергетичний бар'єр, зменшується зі збільшенням маси. Для ізоотопів водню (протію, дейтерію, тритію) різні швидкості протікання реакцій, в яких беруть участь ізоотопні молекули, зумовлено різними масами молекул і різними енергіями активації. Кінетичні ізоотопні ефекти, що виражаються відношенням констант швидкості хімічних реакцій для ізоотопних сполук з участю ізоотопів водню, можуть сягати 2 і більше.

В ізотопній молекулі тритійованої води ковалентний зв'язок T–O міцніший за H–O (Белл, 1977), отже, слід очікувати, що протій може більше тяжіти до протонної форми (гідроксоній H_3O^+), тоді як тритій буде переважно зв'язуватися в ОТ-групах. Грунтуючись на таких припущеннях, досить вірогідним є можливість ізотопного розділення водню електрокінетичними методами (електродіаліз та електроосмос) у водних розчинах на композитних протон-провідних мембранах з використанням ізотопних ефектів I роду.

Відомості про протон-провідні мембрани.

Мембрани, необхідні для електроосмотичного фракціонування ізотопів водню, можуть бути природного або синтетичного походження, для виготовлення яких використовують мінеральну або полімерну речовину. Полімерні мембрани поділяють на гідрофобні й гідрофільні, а мінеральні – на великопористі й дрібнопористі. Композитні мембрани поєднують полімерну і мінеральну складові з різним співвідношенням компонентів модифікатора (Duchin, Sidorova, 1991).

Більшість мембран після занурення в розчин електроліту набувають відносно нього певний заряд. Азбестові, порцелянові й керамічні мембрани зазвичай заряджаються негативно, мембрани з вовняної тканини, алунда та оксидів важких металів – позитивно. Мембрани з пергаментного паперу, карборунду, лляної тканини – нейтральні.

Заряд мембрани може змінюватися залежно від реакції середовища – зі збільшенням лужності електроліту мембрана набуває більш негативний заряд, що збільшує ефективність розділення електроліту за знаком заряду. Заряд мембрани може також викликати додаткове осмотичне перенесення рідини з одного електродного простору до іншого.

Механізми електроосмотичного фракціонування.

Умовою виникнення електроосмосу є існування на межі поділу двох фаз подвійного електричного шару, утвореного внаслідок адсорбції молекул або іонів. Цей ефект проявляється в електролітичних рідинах, що містяться в ємностях з пористою перегородкою, де електричне поле діє вздовж капілярів пористого тіла (рис. 1). Сила, яка забезпечує рух заряджених частинок рідини, спрямована вздовж капілярів у бік електрода, що має заряд протилежний, ніж заряд іонів та іонних комплексів в електроліті.

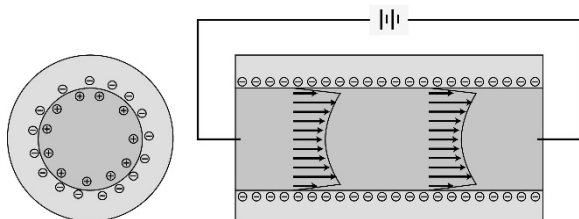


Рис. 1. Утворення електроосмотичного потоку та його переміщення в капілярі під дією електричного поля (Daniel, 2015)

Механізм електроосмосу полягає в такому. Матеріал мембрани при контакті з електролітом дисоціює з поверхні, унаслідок чого в рідину потрапляють іони, що входять до складу речовини мембрани. На міжфазовій межі виникає подвійний дифузний електричний шар (ПЕШ), внутрішня обкладка якого входить до складу твердої фази, а іони з протилежним знаком (протиіони) розташовуються в рідині (рис. 2).

При включенні постійного електричного струму протиіони дифузного шару переміщуються до електрода протилежного знака (рис. 3).

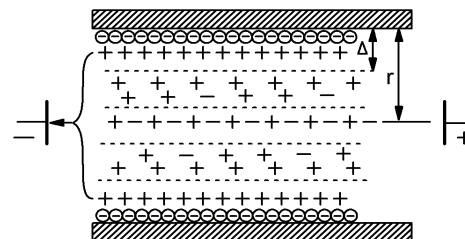


Рис. 2. Формування подвійного дифузного електричного шару в циліндричному капілярі електроосмотичної мембрани (Vojuzkiy, 1975)

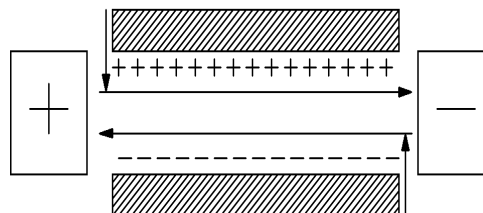


Рис. 3. Переміщення поверхневого дифузного шару іонів рідини в капілярі під дією зовнішнього електричного поля (Vojuzkiy, 1975)

Електроосмотичні процеси в електролітах.

Рух рідини під впливом прикладеного електричного поля відбувається внаслідок того, що поблизу поверхні в зовнішній частині дифузного шару є надлишок іонів одного знака. Електричне поле прикладене до капіляру, наповненого рідиною, змушує надлишкові іони рухатися до протилежно зарядженого полюса. Іони внутрішньої обкладки подвійного шару, що містяться безпосередньо на стінці каналу, не переміщуються, оскільки для подолання електростатичних сил, що діють у молекулярному конденсаторі, потрібно докласти велику напругу.

При віддаленні від поверхні твердотільної мембрани зв'язок з нею іонів стає все слабкішим, і, отже, в об'ємі середньої частини капіляра іони обох знаків перебувають в однакових кількісних співвідношеннях. Накладання зовнішнього електричного поля призводить до іонного руху рівномірно в обидва боки зі швидкостями, відповідними до їхньої рухливості й градієнта прикладеної напруги електричного поля (рис. 3). Таким чином, близько стінки створюється певний потік надлишкових іонів одного знака, і для окремого капіляра круглого перетину формально береться циліндрична оболонка іонів, що рухаються до протилежно зарядженого полюса. Така циліндрична оболонка іонів одного знака, що має спрямований рух, у силу тертя і молекулярного зчеплення може захоплювати із собою іншу масу рідини.

Іони у воді завжди гідратовані, тому при русі іона з ним захоплюється певний обсяг дисперсійного середовища за рахунок сил молекулярного тертя між гідратною оболонкою іона і навколишньою рідиною. Чим більше товщина дифузного шару і менша площа поперечного перерізу капіляра або пори мембрани, тим сильніше виявляється електроосмотичне перенесення рідини (рис. 4).

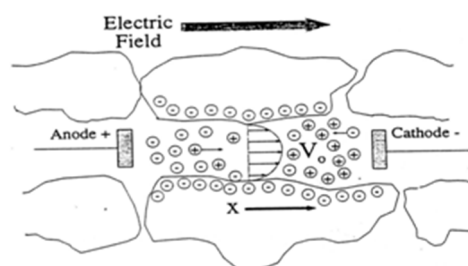


Рис. 4. Формування електроосмотичного потоку в каналах мінеральної мембрани (Athmer et al., 2013)

Швидкість дифузійного перенесення електроліту в капілярі U залежить від дзета-потенціалу дифузійної частини подвійного шару ζ і визначається згідно з виразом (1) (Duhin, Sidorova, 1997):

$$U = S \frac{\zeta \varepsilon E_e}{4\pi \eta l} \quad (1)$$

де ε – діелектрична проникність рідини (безрозмірний коефіцієнт, для водного середовища $\varepsilon = 81$); E_e – потенціал зовнішнього поля, В/м; ζ – дзета-потенціал, В; S – площа перерізу капіляра, м²; l – відстань між електродами, м; η – в'язкість рідини, Н с/м² (Duhin, Sidorova, 1997).

Чим більше дзета-потенціал, тобто чим більше кількість іонів одного знака заряду в дифузійній частині подвійного шару, тим більша сила, що прикладена до рідини в капілярі, і з тим більшою швидкістю відбуватиметься переміщення рідини в капілярі при накладанні зовнішнього поля. Величина і знак електрокінетичного дзета-потенціалу залежить від будови подвійного шару, тобто складу розчину. Зазвичай величина ζ не перевищує 0,1 В, унаслідок чого помітна швидкість руху рідини U виникає лише за великої напруженості електричного поля E_e .

При зростанні концентрації електроліту в розчині дифузійний шар іонів стискається, що призводить до

зникнення рушійної сили для пересування рідини, і електроосмотичне перенесення припиняється. З підвищенням температури зменшується в'язкість рідини, і швидкість переміщення рідини збільшується.

Фракціонування ізотопів водню при електроосмотичних процесах.

Головною характеристикою, яка визначає придатність електроосмотичних мембран для фракціонування ізотопів водню, є їхня протонна провідність. До важливих характеристик протон-провідних мембран також належать: низький електричний опір за оптимальних температур (до 75 °C), хімічна стійкість до розчинів електролітів у лужному та в кислому середовищах, що утворюються в результаті електрохімічних процесів у катодному та анодному просторі, і низький коефіцієнт самофільтрації.

Протонні провідники забезпечують ефективне ізотопне фракціонування за допомогою протонного обміну шляхом тунельного або естафетного транспорту іонів (Пальгусев, 1998). При цьому протони (H^+), на відміну від більшості іонів, мають аномально високу рухливість завдяки малим розмірам, тунельному та естафетному способу переміщення через водневі зв'язки між сусідніми полярними групами (табл. 1).

Таблиця 1

Електрорухливість іонів при 25 °C (λ_{∞}) (Эрдеи-Груз, 1976)

Іон	H^+	D^+	OH^-	OD^-	Li^+	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	SO_4^{2-}
M, г/моль	1	2	17	18	7	23	39	24	40	96
λ_{∞} , см ² ·Ом ⁻¹ ·(г-екв) ⁻¹	349,8	250,1	198,3	119,0	38,6	50,1	73,5	53,0	59,5	80,0

Для створення умов, що забезпечують високу протонну провідність мембран, необхідно закріплення в їхніх порах і каналах речовин-модифікаторів. Протонна провідність притаманна багатьом сполукам органічного і неорганічного походження, що можуть бути використані як такі модифікатори (табл. 2). До органічних протон-провідних сполук відносять речовини, що містять полярні групи: $-OH^-$, $-NH_2$, $-NH$, $-SH$, $-COOH$, $-SO_3H$ та ін., до складу яких входить обмінний водень. Серед неорганічних протон-провідних речовин найбільш поширеними є гетерополексислоти, кислі солі та оксиди, що містять поверхневі протон-провідні групи (Phairm, Badwal, 2006).

Гідрофосфати і гідроарсенати уранілу мають досить високу іонну провідність, але є дуже небезпечними сполуками, що потребують особливих умов поводження з ними. Поверхнево-модифіковані β -глинозем ($\beta-Al_2O_3(H_3O^+)$) та протонований (H_3O^+) монтморилоніт характеризуються

дещо гіршою іонною провідністю ($5 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-4}$), але широко розповсюджені, безпечні, дешеві й легко придатні до застосування як електроосмотичні мембрани.

Можливість використання шаруватих силікатів монтморилонітової та палигорськітової груп, а також каркасних силікатів цеолітової групи як реагуючої речовини для вилучення тритію із водних розчинів підтверджено результатами наших досліджень в експериментальних динамічних і статичних системах (Lytovchenko et al., 2006; Lopez-Galindo et al., 2008; Пушкарьов, Приймаченко, 2010, а, б; Пушкарьов та ін., 2007, 2012, 2014, 2016).

Інші неорганічні сполуки, наведені в табл. 3, мають незначну стійкість у лужних розчинах електролітів, що унеможливило їхнє використання як мембран. Іонообмінні смоли, незважаючи на низький електричний опір, потребують складного технологічного обладнання для їхнього виготовлення.

Таблиця 2

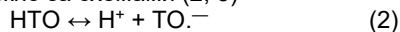
Протон-провідні речовини та їхні фізичні властивості (Phairm, Badwal, 2006)

№	Речовина	Опір мембрани, σ (Ом·см ⁻¹)	Оптимальна температура провідності, °C	Агрегатний стан (у воді)
1	$H_3Mo_{12}PO_{40} \cdot 29H_2O$	2×10^{-1}	25	P*
2	$H_3W_{12}PO_{40} \cdot 29H_2O$	$0,8 \times 10^{-2}$	25	P
3	$H_4W_{12}SiO_{40} \cdot 28H_2O$	2×10^{-2}	25	P
4	$H_4UO_2PO_4 \cdot 4H_2O$	4×10^{-3}	17	T*
5	$H_4UO_2AsO_4 \cdot 4H_2O$	6×10^{-3}	37	T
6	$\beta-Al_2O_3(H_3O^+)$	5×10^{-3}	25	T
7	(H_3O^+)-монтморилоніт	4×10^{-4}	17	T
8	$Sb_2O_5 \cdot 4H_2O$	3×10^{-4}	25	T
9	$\alpha-Zr(HPO_4)_2 \cdot nH_2O$	1×10^{-4}	25	T
10	$\gamma-Zr(PO_4)(H_2PO_4) \cdot 2H_2O$	3×10^{-4}	25	T
11	$\gamma-Zr$ сульфосфат	1×10^{-2}	25, 100	T
12	(Ta, Zr) – змішані гідрофосфати	2×10^{-4}	25	T
13	$Cs_3(HSO_4)_2(H_2PO_4)$	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-2}$	40–180	T
14	$SnO_2 \cdot nH_2O$	4×10^{-4}	25	T
іонообмінні смоли в H^+ і OH^- формах				
15	NAFION (натрій перфтор-етилен сульфонат)	5×10^{-2}	25	T
16	S-PBI (полібензімідазолсульфонат)	1×10^{-2}	25	T
17	S-PEEK (поліетер ефір кетонсульфонат)	3×10^{-2}	25	T

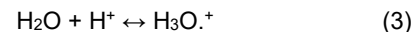
*Примітка: P – рідкий стан, T – твердий стан.

Крім означених вище модифікуючих речовин, існують сполуки, що набувають протон-обмінні властивості в результаті взаємодії з водними розчинами за більш високих температур (від 100 до 1000 °C). До них належать оксиди металів – TiO_2 , Fe_2O_3 , NASICON, гідроксиапатит, силікатні матеріали (скло силікатне), а також конденсовані органічні іонообмінні сполуки з протон-провідними властивостями.

При взаємодії розчина з речовиною мембран в їхніх каналах відбувається поляризація та часткова дисоціація молекул електроліту з формуванням ПЕШ. У мінеральних мембранах, характерним представником яких є монтморилоніт-цеолітовий композит, базальні поверхні частинок глинистого мінералу мають некомпенсований від'ємний заряд. Унаслідок цього поляризовані молекули НТО та позитивно заряджені іони водню з дисоційованих молекул тритійованої води наближуються до стінок каналів мінеральної мембрани. Згідно з існуючими уявленнями важкі ізотопи водню утворюють міцніший ковалентний зв'язок із киснем порівняно з (Белл, 1977). При заміні протію на дейтерій у сполуках з ОН-групами відбувається збільшення енергії розриву водневих зв'язків приблизно на 100 кал/моль (Рабинович, 1968). У випадку із тритієм завдяки ізотопному ефекту очікується більш міцний ковалентний полярний зв'язок О–Т. Тому імовірний процес дисоціації молекул тритійованої води відбувається переважно за схемами (2, 3)



Вивільнений протон приєднується до молекули води з утворенням іона H_3O^+ :



Іони H_3O^+ і TO^- , утворені завдяки здатності протона "перескакувати" з однієї молекули на іншу, більш рухливі, ніж інші однозарядні іони. При цьому один із протонів іона H_3O^+ може переміщуватися у воді вздовж водневих зв'язків стрибками за механізмом естафетного перенесення (рис. 5) швидше за іон H_3O^+ (Athmer et al., 2013).

Схожим чином протон може рухатися уздовж водневих зв'язків між іоном OH^- та молекулою НТО (рис. 6).

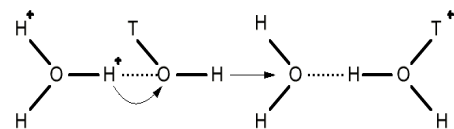


Рис. 5. Естафетне переміщення протона між гідроксонієм H_3O^+ та молекулою H_2O з утворенням гідроксонію H_3O^+ і молекули НТО

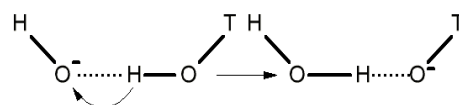


Рис. 6. Естафетне переміщення протона між іоном OH^- та молекулою НТО

Деяка частина вільних протонів згідно з існуючими уявленнями (Зацепина, 1974) може переміщуватися в електроліті за механізмом тунельного перенесення (рис. 7).

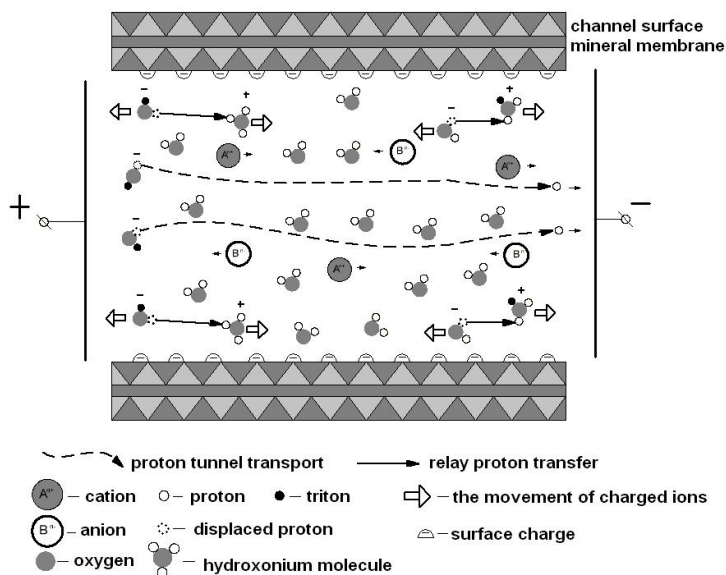


Рис. 7. Тунельне та естафетне переміщення іонів із фракціонуванням ізотопів водню в каналі монтморилонітової мембрани

За наявності прикладеного зовнішнього електричного поля обидва процеси викликають міграцію електричного заряду. Дослідження ізотопних ефектів у процесах перенесення протона, виконані Р. Беллом (Белл, 1977), свідчать, що H_2O , D_2O і T_2O мають зіставні іонні добутки, а параметри фракціонування ізотопів водню при 25 °C дорівнюють: $K^{\text{H}}/K^{\text{D}} = 7,47$ і $K^{\text{H}}/K^{\text{T}} = 16,4$ (мольних одиниць).

Полімерні мембрани можуть бути гідрофільними або гідрофобними. Фракціонування ізотопів водню у гідрофільних мембранах відбувається майже за таким механізмом, який характерний для мінеральних мембран. Відмінністю є те, що в мінеральних мембранах протіони концентруються біля стінок каналів, що мають некомпенсований від'ємний заряд, обумовлений особливостями

складу та структурної будови глинистих частинок. У гідрофільних мембранах поверхневий заряд формується групами $-\text{OH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{NH}_2$, зв'язаними з органічним каркасом мембран. До речовин, що утворюють гідрофільні мембрани, належать групи природних полімерів – полісахариди (целюлоза, хітозан та ін.), білкові макромолекули і синтетичні поліаміди.

У гідрофобних мембранах умови для виникнення в каналах шару протіонів (протонів та іонів гідроксонію) створюють молекули-модифікатори (сульфонові – SO_3H , карбоксильні – COOH , алкіламонієві – NR_3^+ , фосфорильні – OPO_3H_2 та ін.). Найбільш ефективними поверхневими модифікаторами є негативно заряджені сульфонові групи (Kokotov, 1980). Під впливом електричного поля в каналах

мембран формується електроосмотичний потік з вивільнених протонів та утворених при дисоціації молекул НТО іонів гідроксонію. Протиіони переміщуються до катода

вздовж заряджених груп молекул-модифікаторів за механізмами естафетного або тунельного перенесення (рис. 8).

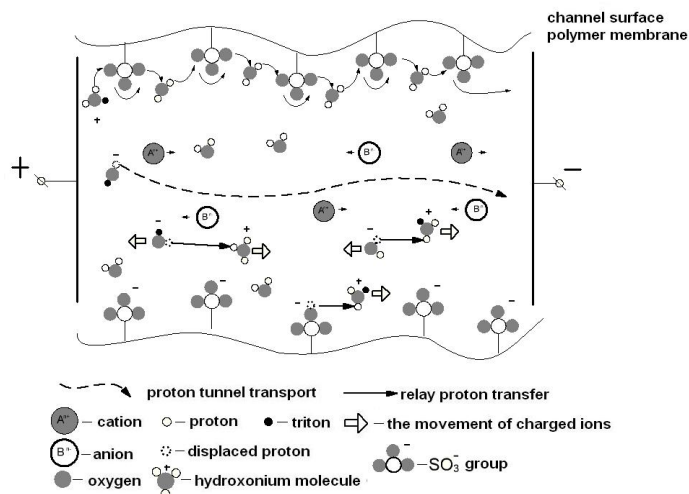


Рис. 8. Тунельне та естафетне переміщення протона із фракціонуванням ізотопів водню в каналі полімерної мембрани

Такий електроосмотичний процес призводить до перерозподілу ізотопного співвідношення в прианодному та прикатодному просторах. При цьому, чим більше товщина дифузного шару і менша площа поперечного перерізу капіляра або пори мембрани, тим сильніше виявляється електроосмотичне перенесення іонів.

Висновки. На основі аналізу особливостей електроосмотичних процесів, що реалізуються у протон-провідних мембранах, установлена можливість фракціонування ізотопів водню в електролітах, утворених з використанням тритійованої води.

При взаємодії розчину з речовиною мембран в їхніх каналах відбувається поляризація та часткова дисоціація молекул електроліту. На межі поділу двох фаз утворюється подвійний електричний шар унаслідок адсорбції молекул або іонів. В електролітичних рідинах, що є в ємностях, розділених пористою електроосмотичною мембраною, електричне поле діє вздовж капілярів пористого тіла. Сила, яка забезпечує рух заряджених частинок рідини, спрямована вздовж капілярів у бік електрода, що має заряд протилежний, ніж заряд іонів та іонних комплексів в електроліті.

Головними характеристиками, які визначають придатність електроосмотичних мембран для фракціонування ізотопів водню, є їхня протонна провідність. Електроосмотичними мембранами можуть використовуватися мінеральні або полімерні композитні матриці. Для створення умов, що забезпечують високу протонну провідність мембран, необхідно закріплення в їхніх порах і каналах речовин-модифікаторів органічного або неорганічного походження.

Важкі ізопопи водню утворюють міцніший ковалентний зв'язок з киснем порівняно з протієм, тому імовірний процес дисоціації молекул води, які містять змішані ізопопи водню, відбувається переважно за схемами: $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{TO}^-$ та $\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+$. При цьому протон може переміщатися у воді вздовж водневих зв'язків стрибками за механізмами естафетного переміщення між молекулами та іонами або частково шляхом тунельного перенесення.

При накладанні зовнішнього електричного поля в каналах мембран формуються електроосмотичні потоки з вивільнених протонів та утворених при дисоціації молекул НТО іонів гідроксонію і гідроксильних груп TO^- . Такий електроосмотичний процес приводить до перерозподілу ізотопного співвідношення у прианодному та прикатодному просторах. Збільшення товщини дифузного шару і

зменшення площі поперечного перерізу капіляра або пори мембрани сприяють більш ефективному електроосмотичному фракціонуванню ізотопів водню.

Список використаних джерел

- Белл, Р. (1977). Протон в химии. М.: Мир.
- Бердонос, С.С. (1990). Изотопные эффекты. Химическая энциклопедия. Т. 2. М.: Советская энциклопедия.
- Воецкий, С.С. (1975). Курс коллоидной химии. 2 изд. М.: Химия.
- Духин, С.С., Сидорова, М.П., Ярошук, А.Э. (1991). Электрохимия мембран и обратный осмос. Л.: Химия.
- Духин, С.С., Сидорова, М.П., Ярошук, А.Э. (1991). Электрохимия мембран и обратный осмос. Л.: Химия.
- Зацепина, Г.Н. (1974). Свойства и структура воды. М.: МГУ.
- Кокотов, Ю.А. (1980). Иониты и ионный обмен. Л.: Химия.
- Пальгев, С.Ф. (1998). Высокотемпературные протонные твердые электролиты. Обзор. Екатеринбург: УрОПАН.
- Пушкарев, А.В., Долин, В.В., Приймаченко, В.М., Бобков, В.М., Пушкарева, Р.А. (2007). Кинетика изотопно-водородного обмена в бентонитопесчаной смеси. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 15, 27–36.
- Пушкарьов, О.В., Руденко, І.М., Кошелев, М.В., Скрипкін, В.В., Долин, В.В. (мол.), Приймаченко, В.М. (2016). Мінеральний адсорбент тритію на основі сапоніту та цеоліту. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 25, 38–48.
- Пушкарьов, О.В., Приймаченко, В.М., Золкін, І.О. (2012). Властивості бентоніто-цеолітових композитів щодо вилучення тритію з тритієвої води. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 20, 98–107.
- Пушкарьов, О.В., Приймаченко, В.М. (2010а). Взаємодія тритієвої води з глинистими мінералами. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 18, 149–158.
- Пушкарьов, О.В., Приймаченко, В.М. (2010б). Оцінка кінетики ізотопно-обмінних реакцій в глинистих мінералах. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 18, 140–148.
- Пушкарьов, О.В., Руденко, І.М., Долин, В.В. (мол.), Приймаченко, В.М. (2014). Сепіоліт-цеолітові композити як потенційні водопроникні реакційні бар'єри. *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*, 23, 75–84.
- Рабинович, І.Б. (1968). Влияние изотопии на физико-химические свойства жидкостей. М.: Наука.
- Эрдеи-Груз, Т. (1976). Явления переноса в водных растворах. М.: Мир.
- Athmer, C., Ruef, C., Jones, T., Wilkens, R. (2013). Desalination of Kaolin Soil Using Radial Electromigration and Electroosmosis. *J. Hazard. Toxic Radioact. Waste*, 10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000137, 16–20.
- Daniel, J. Laser (2015). Theory of Operation. Retrieved from: http://micromachine.stanford.edu/~dlaser/research_pages/silicon_eo_pumps.html
- Lopez-Galindo, A.P., Fenoll-Hach-Ali, P., Pushkarev, A.V., Lytovchenko, A.S., Baker, J.H., Pushkarova, R.A. (2008). Tritium redistribution between water and clay minerals. *Applied Clay Science*, 39, 151–159.
- Lytovchenko, A.S., Pushkarev, A.V., Samodurov, V.P., Baker, J.H., Fenoll-Hach-Ali, P., Lopez-Galindo, A. (2005). Assessment of the potential ability of phyllosilicates to accumulate and retain tritium in structural OH-groups. *Mineralogical Journal*, 2, 59–65.
- Phaim, J.W., Badwal, S.P.S. (2006). Review of proton conductors for hydrogen separation. *Ionics*, 12, 103–115. <https://doi.org/10.1007/s11581-006-0016-4>

References

- Athmer, C., Ruef, C., Jones, T., and Wilkens, R. (2013). Desalinization of Kaolin Soil Using Radial Electromigration and Electroosmosis. *Toxic Radioact. Waste*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000137](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000137), 16–20.
- Bell, P. (1977). Proton in Chemistry. Moscow: Mir. [in Russian]
- Berdonov, C.C. (1960). Isotopic effects. Chemical Encyclopedia. V. 2. Moscow: Soviet encyclopedia. [in Russian]
- Daniel, J. Laser. (2015). Theory of Operation. Retrieved from: http://micromachine.stanford.edu/~dlaser/research_pages/silicon_eo_pumps.html
- Duchin, C.C., Sidorova, M.P., Jaroshchuk, A.E. (1991). Electrochemistry membranes and effects of reverse osmosis. Leningrad: Chemistry. [in Russian]
- Duhin, S.S., Sidorova, M.P., Yaroshchuk, A.E. (1991). Electrochemistry of membranes and reverse osmosis. Leningrad: Chemistry. [in Russian]
- Erdei-Gruz, T. (1976). Transport phenomena in aqueous solutions. Moscow: Mir. [in Russian]
- Kokotov, Ju. A. (1980). Ion exchangers and ion exchange. Leningrad: Chemistry. [in Russian]
- Lopez-Galindo, A.P., Fenoll-Hach-Ali, P., Pushkarev, A.V., Lytovchenko, A.S., Baker, J.H., Pushkarova, R.A. (2008). Tritium redistribution between water and clay minerals. *Applied Clay Science*, 39, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2007.06.005>
- Lytovchenko, A.S., Pushkarev, A.V., Samodurov, V.P., Baker, J.H., Fenoll-Hach-Ali, P., Lopez-Galindo, A. (2006). Assessment of the potential ability of phyllosilicates to accumulate and retain tritium in structural OH-groups. *Mineralogical Journal*, 2, 59–65.
- Palguyev, C.F. (1998). High-temperature proton-conducting solid electrolytes. Ekaterinburg: UrORAN. [in Russian]
- Phairm, J.W., Badwal, S.P.S. (2006). Review of proton conductors for hydrogen separation. *Ionics*, 12, 103–115. <https://doi.org/10.1007/s11581-006-0016-4>
- Pushkarev, O.V., Rudenko, I.M., Dolin, V.V. (Jr.), Prymachenko, V.M. (2014). Sepiolite-zeolite composites as a potential reactivity waterproof barriers. *Collected papers of Institute of Environmental Geochemistry*, 23, 75–84. [in Ukrainian]
- Pushkarev, O.V., Prymachenko, V.M., Zolkin, I.O. (2012). Bentonite-zeolite composites' properties with respect to tritium extraction from tritium water. *Collected papers of Institute of Environmental Geochemistry*, 20, 98–107. [in Ukrainian]
- Pushkarev, O.V., Prymachenko, V.M. (2010a). Estimation of the kinetics of the exchange-isotopic reactions in clay minerals. *Collected papers of Institute of Environmental Geochemistry*, 18, 140–148. [in Ukrainian]
- Pushkarev, O.V., Rudenko, I.M., Koshelev, M.V., Skripkin, V.V., Dolin, V.V. (Jr.), Prymachenko, V.M. (2016). Mineral adsorbent of tritium based on saponite and zeolite. *Collected papers of Institute of Environmental Geochemistry*, 25, 38–48. [in Ukrainian]
- Pushkarev, O.V., Dolin, V.V., Prymachenko, V.M., Bobkov, V.N., Pushkareva, R.A. (2007). Kinetics of Hydrogen isotope exchange in bentonite-sand mixture. *Collected papers of Institute of Environmental Geochemistry*, 15, 27–36. [in Ukrainian]
- Pushkarev, O.V., Prymachenko, V.M. (2010b). Interaction between tritium water and clay minerals. *Collected papers of Institute of Environmental Geochemistry*, 18, 149–158. [in Ukrainian]
- Rabinovich, I.B. (1968). The influence of isotopes on the physicochemical properties of liquids. Moscow: Nauka. [in Russian]
- Vojuzkiy, C.C. (1975). Course of Colloid Chemistry. 2nd ed. Moscow: Chemistry. [in Russian]
- Zacepina, G.N. (1974). The properties and structure of water. Moscow: MSU. [in Russian]

Надійшла до редакції 18.09.2020

O. Pushkar'ov, Dr. Sci. (Geol.), Leading Researcher,
E-mail: pushkarevigns@gmail.com;
A. Zubko, Researcher,
E-mail: zhubko@rambler.ru;
I. Sevruck PhD (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: Irina_mihalovna@ukr.net;
V. Dolin (Jr.), Junior Researcher,
E-mail: dolinvitaliy@gmail.com;
SE "Institute of environmental Geochemistry of the NAS of Ukraine",
34, a, Acad. Palladin Ave., Kyiv-142, 03680, Ukraine

ELECTRO-OSMOTIC FRACTIONATION OF HYDROGEN ISOTOPES IN ELECTROLYTIC SOLUTIONS USING COMPOSITE PROTON-PERMEABLE MEMBRANES

Based on the analysis of the features of electroosmotic processes that are implemented in proton-conducting membranes, the possibility of fractioning hydrogen isotopes in electrolytes formed using tritiated water (HTO) is estimated. The interaction of the solution with the membranes in their channels leads to polarization and partial dissociation of the electrolyte molecules. In water molecules, when protium is replaced by a heavy isotope of hydrogen, the energy of breaking of hydrogen bonds increases and the process of their dissociation proceeds predominantly according to the scheme: $\text{HTO} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{TO}^-$. A part of the released protons can join water molecules to form the H_3O^+ ion. H_3O^+ and TO^- ions are more mobile than other singly charged ions. The main characteristic that determines the suitability of electroosmotic membranes to the fractionation of hydrogen isotopes is proton conductivity. The released protons have anomalously high mobility due to their small size, tunnel and relay movement through hydrogen bonds between adjacent polar groups in the channels of the proton-conducting membranes. To ensure high proton conductivity in the pores and channels of the membranes, modifying substances are fixed, which contain the groups: $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}$, $-\text{SH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$, acid salts and oxides, containing surface proton-conducting groups. To create proton-conducting membranes, it is possible to use surface-modified β -alumina ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H}_3\text{O}^+)$) and protonated (H_3O^+) montmorillonite with ionic conductivity ($5 \times 10^3 - 4 \times 10^4 \text{ Ohm} \times \text{cm}^{-1}$). The most effective are surface modifiers with negatively charged sulfonic groups. The imposition of an external electric field leads to the movement of ions in the electrolyte, which leads to a redistribution of the isotope ratio in the near-anode and cathode spaces.

Keywords: hydrogen isotopes, electroosmotic processes, electrolyte, fractionation, membranes, proton conductivity.

A. Пушкарєв, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: pushkarevigns@gmail.com;
A. Зубко, науч. сотр.,
E-mail: zhubko@rambler.ru;
И. Севрук, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: Irina_mihalovna@ukr.net;
В. Долин (мл.), мл. науч. сотр.,
E-mail: dolinvitaliy@gmail.com;
ГУ "Институт геохимии окружающей среды НАН Украины",
пр. Акад. Палладина, 34, а, г. Киев-142, 03680, Украина

ЕЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОЕ ФРАКЦИОНИРОВАНИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ ПРОТОН-ПРОВОДЯЩИХ МЕМБРАН

На основе анализа особенностей электроосмотических процессов, которые реализуются в протон-проводящих мембранах, оценена возможность фракционирования изотопов водорода в электролитах, образованных с использованием тритированной воды (HTO). При взаимодействии раствора с мембранами в их каналах происходит поляризация и частичная диссоциация молекул электролита. В молекулах воды при замене протия на тяжелый изотоп водорода увеличивается энергия разрыва водородных связей, и процесс их диссоциации протекает преимущественно по схеме: $\text{HTO} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{TO}^-$. Часть высвобожденных протонов может присоединяться к молекулам воды с образованием иона H_3O^+ . Ионы H_3O^+ и TO^- подвижнее, чем другие однозарядные ионы. Главной характеристикой, которая определяет пригодность электроосмотических мембран к фракционированию изотопов водорода, есть протонная проводимость. Высвобожденные протоны имеют anomalously высокую подвижность благодаря малым размерам, туннельному и эстафетному перемещению через водородные связи между соседними полярными группами в каналах протон-проводящих мембран. Для обеспечения высокой протонной проводимости в порах и каналах мембран закрепляют вещества-модификаторы, которые содержат группы: $-\text{OH}$, $-\text{NH}_2$, $-\text{NH}$, $-\text{SH}$, $-\text{COOH}$, $-\text{SO}_3\text{H}$, кислые соли и оксиды, которые содержат поверхностные протон-проводящие группы. Для создания протон-проводящих мембран возможно использование поверхностно-модифицированного β -глинозема ($\beta\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{H}_3\text{O}^+)$) и протонированного (H_3O^+) монтмориллонита с ионной проводимостью ($5 \times 10^3 - 4 \times 10^4 \text{ Ом} \times \text{см}^{-1}$). Наиболее эффективными являются поверхностные модификаторы с негативно заряженными сульфоновыми группами. Наложение внешнего электрического поля вызывает движение ионов в электролите, что приводит к перераспределению изотопного соотношения в прианодном и катодном пространствах.

Ключевые слова: изотопы водорода, электроосмотические процессы, электролит, фракционирование, мембраны, протонная проводимость.

UDC 549:553.31(477.63)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.03>

S. Tikhliivets, PhD (Geol.), Associate. prof.
E-mail: tikhliivets.svetlana@gmail.com;
Kryvyi Rih National University,
37 Pushkina Str., Kryvyi Rih, 50002, Ukraine

VARIABILITY OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF MAGNETITE AND QUARTZ OF THE NORTHERN DISTRICT OF KRYVYI RIH BASIN

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

Physical properties of minerals represent a function of their chemical composition, features of morphology and anatomy. Their variability is influenced by geological syngenetic and epigenetic processes that occur within the iron ore deposits of Kryvyi Rih basin. The latter is represented by nine deposits, which are exploited by five ore mining and enrichment works (GZKs). The Northern region of Kryvyi Rih basin includes Hannivske and Pervomayske deposits. The productive strata of both deposits consist of low-grade magnetite ores of the fifth and sixth ferruginous horizons. They are characterized by the authigenic-metamorphogenic mineralogical zonation.

The purpose of the work is conditioned by the need for a detailed study of the laws of variability of chemical composition and physical properties of rock-forming minerals (magnetite and quartz), taking into account their position within zonal ore deposits.

The study of the physical properties of rock-forming minerals was carried out according to standard methods using a microhardness tester, the chemical composition was investigated by segregating monomineral fractions of magnetite and quartz from ores of metamorphic or metasomatic origins of various mineral composition using a magnetic separator. The chemical analyzes were carried out in a standardized chemical laboratory. Statistical studies were performed using Excel software and Corel Draw.

Result of the researches showed the nature of variability of the chemical composition, physical properties of magnetite and quartz in the sections of metamorphogenic and metasomatically altered ore strata of iron ore deposits.

Practical significance is conditioned by the necessity of conducting detailed topomineralogical study of the productive strata of iron ore deposits of Kryvyi Rih basin in relation to the work on updating the mineralogical and technological map of the deposit, compiling an optimal scheme for ore blending in order to increase efficiency of the use of natural technological potential of magnetite quartzites on the basis of studying physical and chemical properties of the main rock-forming minerals of ferruginous quartzite.

Keywords: Ukrainian Shield, banded-iron formation, Kryvyi Rih basin, ferruginous quartzites, magnetite, quartz.

Challenge problem. The Northern region of Kryvyi Rih basin is represented by two deposits - Hannivka and Pervomayske, which are exploited by similarly named open-pits of the Northern Ore Mining and Beneficiating Works (PivnGZK) (Glazunov, 2009). Productive strata of these deposits are composed of low-grade magnetite quartzites of the fifth and sixth ferruginous horizons.

Syngenetic processes occurrence has caused the forming of an authentically metamorphogenic mineralogical zonation within the productive strata of Hannivka and Pervomayske deposits (Belevtsev, 1970; Chubarov and Evtekhov, 1996), where it is manifested the most fully. Generally, in the sections of the fifth and sixth horizons in the direction from the hanging and foot walls to their central zones, there is a natural change in the layers represented by ferruginous quartzite of the following mineral composition: magnetite-cummingtonite quartzites → cummingtonite-magnetite quartzites → magnetite quartzites → micaceous hematite-magnetite quartzites (Evtekhov, 2009; Karpenko, 2008). In the sections of the sixth ferruginous horizon, the latter are relatively thin or absent.

Ores of the deposits have also undergone epigenetic processes (Paranko, 1997), which influenced the qualitative parameters of magnetite quartzites such as: tectonogenesis, sodium metasomatism, hypergenesis (Tikhliivets, 2017), and others. The influence of these processes has led to the formation of a modern topomineralogical variability of the productive strata of both Hannivka and Pervomayske deposits. Based on the above, the author decided to conduct research within the productive strata of Hannivka deposit.

In accordance with the mineralogical zoning of iron ore deposits, there is not only a natural change in the content of ore-forming, secondary and accessory minerals in ferruginous quartzites, but also a variability of the chemical composition and physical properties of the minerals. The latter determines the versatility of technological parameters of the ferruginous quartzites, which needs a detailed study of the properties of rock-forming minerals.

Research analysis. The issue of dependence of the chemical and physical characteristics of minerals on the mineral composition of ferruginous quartzites, their position in the sections of deposits was studied by many preceding

researchers (Belevtzev, 1970; Bespoyasko, 2004; Evtekhov and Dotsenko, 1979; Prušinskienė, 2017; Rakovich, 1983; Tikhliivets, 2017). The authors concluded that there are general patterns of variation of most parameters in sections of ore deposits of different genesis.

The physical, chemical and technological parameters of the ores of the deposit were studied in the 50s-70s of the 20th century in connection with the design and start of work of the Northern Ore Mining and Beneficiating Works. The tests were carried out in the course of preliminary, detailed, operational exploration of Hannivka and Pervomayske deposits, in connection with the implementation of research works (Evtekhov and Dotsenko, 1979). The questions of research analysis about sodium metasomatites of the Pervomayske deposit are disclosed in Tikhliivets's work (Tikhliivets and Filenko, 2017). The variability of morphological characteristics of ore minerals, taking into account their position within zonal ore deposits, is shown in work (Tikhliivets, 2019). In this work, the author reveals the need to study the physical and chemical properties of main ore minerals, depending on their location in the productive strata of the deposit.

Objective of the research consisted in a more detailed determining of the laws of variability of minerals chemical composition, taking into account their position within zonal ore deposits. The main attention was paid to studying the laws of change in the chemical composition and physical properties of the main ore-forming minerals in the zones of ferruginous horizons and bodies of sodium metasomatites of the productive strata of Hannivka deposit. The microhardness of magnetite and quartz was taken as the main characteristic of the physical properties of rock-forming minerals.

The purpose of the research conducted is due to the need for continuous monitoring of mineral composition, structure, texture of ores and, as a consequence, physical properties and chemical composition of the main rock-forming minerals of ferruginous quartzite for further improvement of the technological parameters of iron concentrate.

Research methodology. In the process of studying the physical properties of magnetite and quartz, standard techniques were used. Determining of microhardness was carried out using a microhardness tester MP-1. 200-300

measurements were performed for magnetite and quartz from each zone.

To perform a detailed study of the chemical composition of magnetite the author identified its 87 monomineral fractions from ores of metamorphic and metasomatic origin. The samples represented all the mineralogical zones of the ore deposits of both genetic varieties. The content determining of chemical components in the magnetite was conducted using the method of complete silicate chemical analysis in the laboratories of PivnGZK and Kryvyi Rih integrated geological party. To study the content of chemical components in quartz, its monomineral fractions were used, which served for conducting semiquantitative spectral analyzes. The latter were carried out in the chemical laboratory of Kryvyi Rih integrated party.

Laying out the main material. Physical properties of minerals represent the function of their chemical composition, the structure of the crystalline lattice, the features of morphology and anatomy (Pavlyshyn et al., 2003; Bespoyasko, 2004; Matkovskiy et al., 2006; Tikhlyvets and Filenko, 2018). The close connection between these properties of the minerals of the banded-iron formation was mentioned in the previous works (Evtekhov, 1992;

Pavlyshyn, 1984). In the works of V.D. Evtekhov (Evtekhov, 1992) the data concerning connection of physical properties of the minerals with their positions in the sections of iron ores bodies of various deposits of Kryvyi Rih basin of different origins (metamorphites, metasomatites) were given.

Microhardness is one of physical properties of minerals. The author of this article investigated the character of the variability of this indicator in magnetite and quartz for the sections of the ferruginous horizons and bodies of sodium metasomatites. Samples of sodium metasomatites were selected from layers of micaceous hematite-magnetite and magnetite quartzites. The metasomatic bodies of the central zones of the ferruginous horizons, represented by ferruginous quartzite of this composition, are characterized by the most complete and clear manifestations of metasomatic zonation. The latter is represented by the following zones: the aegirization zone (central), the zone of riebeckitization (intermediate), the zone of silicification (peripheral zone) (Tikhlyvets and Filenko, 2017).

The nature of the variability of the hardness of magnetite in the zones of stratigraphic horizons and metasomatic bodies is shown in the Table 1–2.

Table 1

The hardness of magnetite from unaltered ferruginous quartzites of the productive strata of Hannivka deposit

№	Mineral varieties of ferruginous quartzites	The hardness H_v , MPa		
		n	x	S_x
1	Micaceous-hematite-magnetite quartzites	18	5236	738
2	Magnetite quartzites	16	5147	751
3	Cummingtonite-magnetite quartzites	17	5123	763
4	Magnetite-cummingtonite quartzites	15	5014	782

Note: n - number of definitions; x is the average value of the indicators; S_x - standard deviation.

Table 2

The hardness of magnetite from sodium metasomatites of the productive strata of Hannivka deposit

№	Mineral varieties of metasomatites, which were formed in	The hardness H_v , MPa		
		n	x	S_x
micaceous-hematite-magnetite quartzites				
1	Riebeckite- magnetite-aegirine metasomatites	25	5146	805
2	Micaceous-hematite-riebeckite-magnetite quartzites	23	5421	776
3	Micaceous-hematite-magnetite quartzites silificate	15	5523	798
magnetite quartzites				
4	Riebeckite- magnetite-aegirine metasomatites	25	5146	805
5	Riebeckite-magnetite quartzites	17	5396	717
6	Magnetite quartzites silificate	16	5425	825

Note: n - number of definitions; x is the average value of the indicators; S_x - standard deviation.

The magnetite hardness (Fig. 1, a) naturally and gradually decreases from the central zones of the ferruginous horizons, composed of micaceous hematite-magnetite quartzite, to the peripheral ones, composed of magnetite-cummingtonite quartzites. In the same direction, the value of the mean square deviation of this indicator is gradually increasing. The latter can be explained by an increase in the variability of the chemical composition of magnetite. The decrease of the mean values of microhardness might be due to the decrease in hematite minerals in it (Fe_2O_3 content), which is characterized by higher microhardness (Evtekhov and Dotsenko, 1979).

The hardness of magnetite in the zones of the bodies of sodium metasomatites (Fig. 1, b) also varies. From the central zones of aegirization to the peripheral zones of silicification of ferruginous quartzites, the value of this indicator is gradually increasing. According to the author, this can be explained by recrystallization, improvement in the process of metasomatic changes in the internal structure of individuals of magnetite. The regularities of the change in the mean square deviation of hardness have not been detected.

In a detailed study of chemical composition of magnetite, which was determined by the method described above, the results of chemical analyzes of metamorphogenic magnetite (Table 3, Fig. 2) and then of magnetite from metasomatic zones (Table 4, Fig. 3) were the first to be analyzed. Chemical analyzes were carried out for quartzites from each zone of autigenic-metamorphogenic (micaceous hematite-magnetite, magnetite, cummingtonite-magnetite, magnetite-cummingtonite) and metasomatic (zones of aegirization, riebeckitization and silicification) zoning.

The chemical composition of metamorphogenic (magnetite, quartz, cummingtonite etc.) and metasomatic (aegirine, riebeckite, albite, etc.) minerals, according to previous researchers (Prušinskienė et al., 2017; Belik, 1984; Evtekhov, 1992; Karpenko and Evtekhov, 2006), is characterized by considerable variability both within the productive strata and in the iron ore deposits as a whole. The above-mentioned authors emphasized the dependence of the chemical composition of minerals on the composition of the enclosing rocks, the thermodynamic conditions of their metasomatic transformations, weathering, and the like.

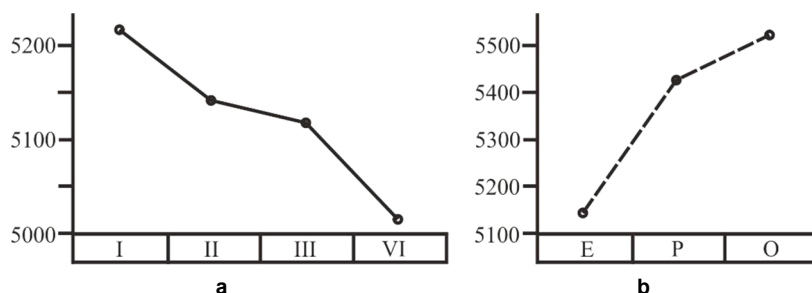


Fig. 1. Variability of the hardness of magnetite from productive strata of deposit:

a – magnetite from unaltered ferruginous quartzites; b – magnetite from sodium metasomatites;
5000–5500 – average value of the hardness.

Mineral varieties of ferruginous quartzites: I – micaceous-hematite-magnetite quartzites; II – magnetite quartzites;
III – cummingtonite-magnetite quartzites; VI – magnetite-cummingtonite quartzites.
Zone of sodium metasomatites: E – aegirization, P – riebeckitization; O – silicification

Table 3

Chemical composition (mas. %) magnetite from unaltered ferruginous quartzites of the productive strata

Chemical components	Mineral varieties of ferruginous quartzites			
	micaceous-hematite-magnetite quartzites	magnetite quartzites	cummingtonite-magnetite quartzites	magnetite-cummingtonite quartzites
SiO ₂	0,87	1,15	1,19	1,26
TiO ₂	0,013	0,013	0,015	0,017
Al ₂ O ₃	0,06	0,08	0,10	0,19
Fe ₂ O ₃	69,23	68,35	67,57	66,97
FeO	29,53	29,91	29,98	30,11
MnO	0,011	0,013	0,015	0,019
MgO	0,16	0,22	0,66	0,88
CaO	0,08	0,16	0,19	0,26
Na ₂ O	0,01	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00
P ₂ O ₅	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	0,01	0,02	0,03	0,05
S	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ O ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ O ⁻	0,01	0,03	0,04	0,06
Total	99,984	99,946	99,671	99,789
Quantity of determinations	10	13	10	14

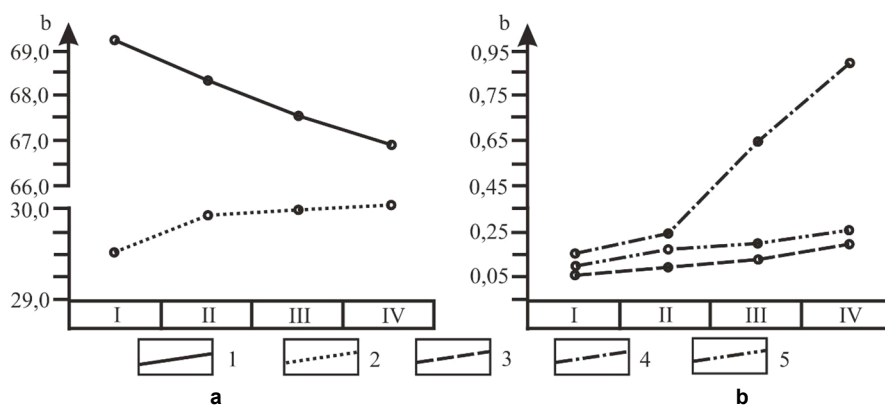


Fig. 2. Variability of ferruginous (a) and aluminum (b) chemical components of magnetite from mineral varieties of ferruginous quartzites of the productive strata.

1 – Fe₂O₃; 2 – FeO; 3 – Al₂O₃; 4 – MgO; 5 – CaO. b – intermedial content of components.
Mineral varieties of ferruginous quartzites: see Fig. 1

According to the data obtained, it is evident that the chemical composition of magnetite in the central zones of the fifth and sixth ferruginous horizons is close to stoichiometric one, which confirms the data of the previous researchers (Rakovych, 1983). In the direction towards peripheral zones there is a significant redistribution of iron between Fe₂O₃ and FeO. The increase in the content of the latter against the reduction of the content of oxidized iron, may be explained by a gradual decrease in the oxygen fugacity in metamorphogenic solutions with the approaching to the contact zones of the ferruginous horizons. The growth

of Al₂O₃, MnO, MgO, CaO in this direction has also been observed, which can be explained by the isomorphic inclusion of these components into the crystalline lattice of magnetite due to their high quantity in the enclosing cummingtonite-magnetite and magnetite-cummingtonite quartzites. SiO₂ is present in the monomineral fractions of magnetite as a mechanical impurity.

Sodium metasomatism also greatly affected the chemical composition of magnetite. In the Table 4, the results of chemical analysis in metasomatic zones formed by micaceous hematite-magnetite and magnetite quartzites are presented.

Table 4

Chemical composition (mas.%) magnetite from sodium metasomatites of the productive strata

Chemical components	metasomatites, which were formed in micaceous-hematite-magnetite quartzites			metasomatites, which were formed in magnetite quartzites		
	1	2	3	1	2	3
SiO ₂	0,83	0,89	0,95	0,89	1,08	1,19
TiO ₂	0,00	0,014	0,012	0,00	0,019	0,007
Al ₂ O ₃	0,21	0,18	0,10	0,21	0,14	0,15
Fe ₂ O ₃	69,07	68,49	68,54	68,94	68,49	67,85
FeO	29,81	30,05	30,14	29,81	30,15	29,79
MnO	0,008	0,016	0,014	0,008	0,013	0,015
MgO	0,27	0,13	0,17	0,27	0,21	0,23
CaO	0,11	0,05	0,14	0,11	0,13	0,16
Na ₂ O	0,05	0,01	0,01	0,05	0,04	0,01
K ₂ O	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01
P ₂ O ₅	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
H ₂ O ⁺	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
H ₂ O ⁻	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03
Total	99,868	100,46	100,136	99,898	100,782	99,452
Quantity of determinations	6	10	4	6	11	6

Note: zone of sodium metasomatites: 1 – aegirization, 2 – riebeckitization; 3 – silicification.

The analysis of the data shows that the composition of the magnetite, which had undergone metasomatic transformations, had an influence on the composition of the enclosing rocks, as well as the composition of metasomatizing solutions. The influence of the content of the enclosing rocks is noticeable when comparing the contents of Al₂O₃, MgO, MnO, CaO, K₂O in magnetite from metasomatically altered micaceous hematite-magnetite and magnetite quartzites. Higher content of these components is observed for magnetite from sodium metasomatites in magnetite quartzites. The higher content of these components is typical for magnetite from the latter ones.

For magnetite from the zones of aegirization high content of chemical components, which were carried by metasomatizing solutions – Al₂O₃, MgO, is typical. Reducing the fugacity of oxygen in the metamorphosed solutions in

the direction from the central to the peripheral zones of the metasomatic bodies caused an increase in the content of FeO in the magnetite in this direction.

Quartz is another rock-forming mineral in ferruginous quartzites of the productive strata of Hannivka deposit. The results the microhardness of quartz measuring in various mineralogical zones of the productive strata of the deposit are given in the Tables 5 and 6. Microhardness of quartz in the direction from the central zone of the productive strata to the peripheral ones revealed its decrease (Fig. 3, a). This is likely to be explained by an increase in the number of gas-liquid inclusions in quartz individuals in this direction. At the same time, the mean square deviation of the microhardness of quartz is also decreasing, which indicates an increase in homogeneity of its individuals after anatomical and micromorphological indexes.

Tables 5

The hardness of quartz from unaltered ferruginous quartzites of the productive strata of Hannivka deposit

№	Mineral varieties of ferruginous quartzites	Hardness H _v , MPa		
		n	x	S _x
1	Micaceous-hematite-magnetite quartzites	30	11798	867
2	Magnetite quartzites	17	11627	764
3	Cummingtonite-magnetite quartzites	12	11578	745
4	Magnetite-cummingtonite quartzites	15	11436	698

Table 6

The hardness of quartz from sodium metasomatites of the productive strata of Hannivka deposit

The hardness of quartz from sodium metasomatites of the productive strata of Hannivka deposit				
№	Mineral varieties of metasomatites, which were formed in	Hardness H _v , MPa		
		n	x	S _x
micaceous-hematite-magnetite quartzites				
1	Riebeckite- magnetite-aegirine metasomatites	20	10846	945
2	Micaceous-hematite-riebeckite-magnetite quartzites	25	11978	736
3	Micaceous-hematite-magnetite quartzites silificate	23	11904	827
magnetite quartzites				
4	Riebeckite- magnetite-aegirine metasomatites	20	10846	945
5	Riebeckite-magnetite quartzites	21	11996	699
6	Magnetite quartzites silificate	25	11644	920

Note: n - number of determinations (analysed samples); x is the average value of the indicators; S_x - standard deviation.

The quartz from sodium metasomatites (Fig. 3, b) is characterized by maximum hardness for the areas of riebeckitization. In one of previous works (Tikhliyets, 2019) the author mentioned that crystals of quartz of this zone are more perfect in comparison with crystals of other zones in terms of micromorphological and anatomical parameters. The minimum hardness is characteristic of quartz from the zones of aegirization.

Regarding the chemical composition, quartz is characterized by an extreme stability. Structural impurities in its crystalline lattice are present in the amount that does not exceed 0.001-0.1mass %. It is also noted that numerous and varied solids and liquid-gas constituents are present in quartz, which largely determines the presence and content of the impurity elements in its composition. The very presence of these inclusions affects the physical properties of quartz, as described above.

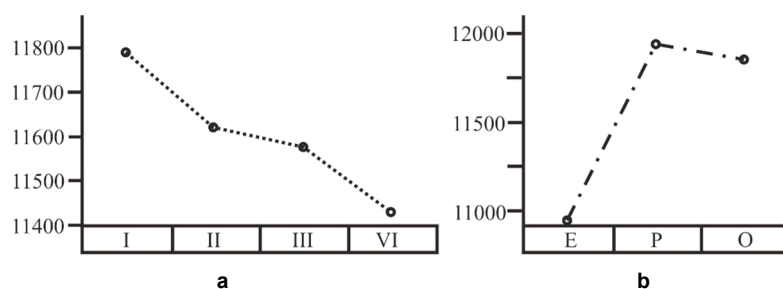


Fig. 3. Variability of the hardness of quartz from productive strata of deposit:

a – quartz from unaltered ferruginous quartzites; b – quartz from sodium metasomatites; 11000–12000 – average value of the hardness. Mineral varieties of ferruginous quartzites: see Fig. 1. Zone of sodium metasomatites: see Fig. 1

From this perspective, the author investigated the variability of contents of impurity elements in quartz from various mineral zones of the productive strata of the deposit using the method of quantitative spectral analysis. The minimum size of mechanical inclusions in crystals of quartz, taking into account the results of microscopic studies, was determined to be 0,001 mm. Quartz-containing ferruginous

rocks were grounded to a grain size of 0,04 mm. This provided almost complete release of quartz attachments to magnetite, micaceous hematite, silicates, carbonates. Using the methods of magnetic and gravitational beneficiation, monomineral fractions of quartz were obtained. The latter were subjected to semi-quantitative spectral analyzes. The results are shown in Fig. 4 (Table 7–8).

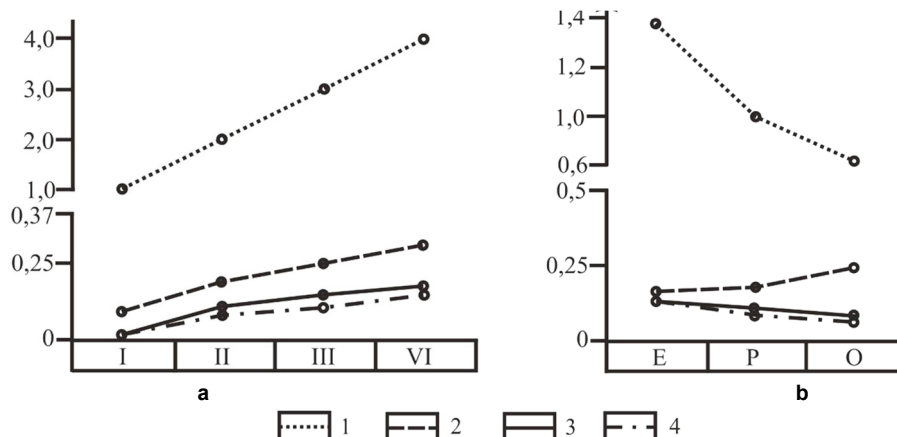


Fig. 4. Variability of the average content (0–0,4) of the admixture elements in quartz from unaltered ferruginous quartzites (a) and from sodium metasomatites (b).

1 – Cu; 2 – Mn; 3 – Zn; 4 – Pb.

Mineral varieties of ferruginous quartzites: see Fig. 1. Zone of sodium metasomatites: see Fig. 1

Table 7

The intermedial content of the admixture elements in quartz from unaltered ferruginous quartzites of the productive strata

№	Mineral varieties	n	Content of the admixture elements									
			Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Cu	Pb	Zn
1	Micaceous-hematite-magnetite quartzites	3	0,0178	0,1127	0,00007	0,0058	0,00047	0,0074	0,00114	0,00102	0,00004	0,00004
2	Magnetite quartzites	5	0,0203	0,0831	0,00019	0,0115	0,00064	0,0035	0,00132	0,00201	0,00006	0,00009
3	Cummingtonite-magnetite quartzites	4	0,0328	0,0586	0,00025	0,0249	0,00097	0,0021	0,00147	0,00306	0,00008	0,00011

Note: n – number of determinations (analysed samples).

The content of elements (V, Bi, Ga, Co, e. a.) was also studied, but their presence was not detected.

Table 8

The intermedial content of the admixture elements in quartz from from sodium metasomatites, which were formed in

№	Mineral varieties	n	Content of the admixture elements									
			Al	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K	Cu	Pb	Zn
micaceous-hematite-magnetite quartzites												
1	Riebeckite- magnetite-aegirine metasomatites	6	0,0503	0,0382	0,00007	0,0108	0,00123	0,0237	0,00742	0,00138	0,00011	0,00007
2	Micaceous-hematite-riebeckite-magnetite quartzites	3	0,0223	0,0403	0,00010	0,0102	0,00082	0,0324	0,00578	0,00102	0,00007	0,00004
3	Micaceous-hematite-magnetite quartzites silificate	4	0,0218	0,0423	0,00013	0,0100	0,00061	0,0098	0,00234	0,0064	0,00004	0,00002
magnetite quartzites												
5	Riebeckite-magnetite-aegirine metasomatites	6	0,0503	0,0382	0,00013	0,0108	0,00123	0,0237	0,00742	0,00138	0,00011	0,00011
6	Riebeckite-magnetite quartzites	5	0,0274	0,0274	0,00016	0,0197	0,00128	0,0273	0,00321	0,00103	0,00007	0,00009
7	Magnetite quartzites silificate	4	0,0238	0,0323	0,00024	0,0246	0,00304	0,0115	0,00236	0,00083	0,00007	0,00007

Note: n – number of determinations (analysed samples).

Variability of the content of Al, Mg, Fe, Ca, Na, K in Fig. 4 are not shown, because their presence in the quartz was due to the presence of very small (up to 0,01 mm) inclusions of magnetite, micaceous hematite, silicates and carbonates.

The data obtained show the content of all elements (Cu, Mn, Zn, Pb) in quartz from the ferruginous quartzites to increase significantly from the central zones of micaceous hematite-magnetite of the fifth ferruginous horizon to peripheral cummingtonite-magnetite ones. This is supposed to be due to the peculiarities of the chemical composition of the enclosing rocks. As a result, the possibility of their entering into a crystalline lattice of quartz or into the smallest mechanical mineral inclusions in its crystals and aggregates increases.

Variations in the content of impurity elements in quartz from sodium metasomatites are characterized by more complicated regularities. The number of chalcophylic elements (Cu, Zn, Pb) significantly decreases in the direction from the central zones of aegirization to the peripheral zones of silicification. In the author's opinion, this is explained by the inwash of these elements by metasomatizing solutions and their maximum deposition in the immediate vicinity of the supply channels. The content of Mn in the indicated direction increases. Perhaps, this is due to its low activity in the metasomatizing solution and, consequently to its transition from the original rock to the solution in the process of metasomatism.

Conclusions. The productive strata of the Northern region of the Kryvyi Rih basin is characterized by the manifestation of various geological processes such as sedimentation, diagenesis, tectonogenesis, metasomatism and others. The manifestation of the autogenic-metamorphogenic zonation within the productive strata of the Pervomayske and Hannivka deposits determines the variability of both physical and chemical properties of the main rock-forming minerals of ferruginous quartzites.

The microhardness of magnetite and quartz naturally decreases in sections of metamorphic deposits of magnetite ores. This index for magnetite from metasomatic zones is gradually increasing, which is due to the improvement in the process of metasomatic changes in the internal structure of its individuals. The maximum microhardness of quartz is typical for the riebeckitization zones. The minimum hardness is characteristic of quartz from the zones of aegirization.

The value of microhardness of minerals can be used as a mineralogical property of magnetite quartzites of different geological locations and different genesis.

The variability of the chemical composition of magnetite varies depending on the manifestation of the geological processes (syngenetic and epigenetic) and the position of the main ore mineral in the section of the productive strata. The influence of the content of the enclosing rocks is noticeable when comparing the contents of Al_2O_3 , MgO , MnO , CaO , K_2O in magnetite from metasomatically altered micaceous hematite - magnetite and magnetite quartzites.

Variations in the content of impurities in quartz from sodium metasomatites are characterized by more complicated laws, compared with the composition of quartz from unaltered ferruginous quartzites. The number of chalcophylic elements decreases from the zones of aegirization to the zones of silicification due to the inwash of these elements by metasomatizing solutions and their maximum deposition in the immediate proximity to the supply channels.

The results of the variation of the chemical composition and physical properties of the main rock-forming minerals in the sections of deposits of ores of various origins must be taken into account in the practical work of the geological and

technological services of the Northern Ore Mining and Beneficiating Works.

Список використаних джерел

- Белевцев, Р.Я. (1970). Метаморфическая зональность Криворожского бассейна. *Геологический журнал*, 30, 4, 25–38.
- Белик, Д.М., Кутин, В.В., Решетняк, В.В. (1984). Зональность разнородных элементов криворожской железорудной свиты. *Изв. АН СССР. Сер. Геол.*, 2, 79–85.
- Беспояско, Е.О. (2004). Вплив мінерального складу на фізичні та технічні властивості вивітрених залізистих порід Інгупецького родовища (Криворізький басейн). *Геолого-мінералогічний вісник Криворізького технічного університету*, 1, 40–47.
- Глазунов, С.Н. (2005). "Северный горно-обогатительный комбинат" на пути динамического развития. *Горный журнал*, 5, 27–29.
- Евтехов, В.Д. (1992). Генетическая и прикладная минералогия натриевых метасоматитов железисто-кремнистых формаций Украинского щита (по природным и экспериментальным данным). *Автореф. дис. ... д-ра геол.-минералог. наук: 04.00.20*. Львов.
- Евтехов, В.Д., Доценко, В.Д. (1979). О магнитных свойствах магнетита Первомайского месторождения Кривбасса. *Материалы научно-технической конференции Криворожского горнорудного института. Секция геолого-минералогическая. Кривой Рог*, 46–53.
- Євтехов, В.Д., Карпенко, С.В., Євтехова, А.В. (2009). Топомінералогія саксаганської світи Ганнівського родовища Криворізького басейну. *Записки Українського мінералогічного товариства*, 6, 77–84.
- Карпенко, С.В., Евтехов, В.Д., Евтехова, А.В. (2009). Аутигенно-метаморфогенная минералогическая зональность продуктивной толщи Анновского месторождения (Криворожский бассейн). *Науковий вісник НГУ*, 3, 54–57.
- Карпенко, С.В., Евтехов, В.Д. (2006). Соотношение значений общего содержания железа и содержания его растворимых форм в рудах Анновского месторождения (Криворожский бассейн). *Геолого-минералогічний вісник*, 2 (16), 92–95.
- Матковский, О., Павлишин, В., Слишко, Е. (2009). Основы минералогії України. Львів: Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка.
- Павлишин, В.И. (1984). Генетические и прикладные аспекты учения о типоморфизме минералов. *Минералогический журнал*, 5, 16–23.
- Павлишин, В.И., Матковский, О.И., Довгий, С.О. (2003). Генезис мінералів. Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет".
- Паранько, І.С. (1997). Форматії і стратиграфія Криворізької структури. *Відомості академії гірничих наук України*, 4, 54–58.
- Ракович, Ф.И. (1983). Типоморфные свойства магнетитов из железисто-кремнистых пород и богатых руд УЩ как показатель условий образования. *Геологический журнал*, 43, 5, 87–92.
- Тіхлівець, С.В., Філенко, В.В. (2018). Морфологічні особливості магнетиту продуктивної товщі Північного району Криворізького басейну. *Мінералогічний збірник*, 68, 58–61.
- Чубаров, В.А., Евтехов, В.Д. (1996). Индексация минеральных разновидностей и технологических сортов руд Кривбасса. *Горный журнал*, 11–12, 14–17.
- Karpenko, S. (2008). Mineralogical zone of ferruginous horizons of Kryvyi Rih Annovskoye deposit. *Збірка тез всеукраїнської науково-практичної конференції, Кривий Ріг*, 128–129.
- Prusinskienė, S., Šiliauskas, L., Skridlaitė, G. (2017). Varieties and chemical composition of magnetite in the Varėna Iron Ore Deposit. *Chemija*, 28 (1), 39–57.
- Tikhlijets, S. (2017). Mineral composition of zones of contact of dikes of granite and rocks of iron-siliceous formation of the Krivoy Rog Basin. *Proceedings of the International Scientific Conference. "International Trends in Science and Technology"*, October 17, 2017, Warsaw, Poland, 4–7.
- Tikhlijets, S., Filenko, V. (2017). Mineralogy of sodium metasomatites of the Pervomayske deposit and their influence on quality of iron ore concentrate. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4 (79), 53–58.
- Tikhlijets, S.V. (2019). Morphological features of magnetite and quartz from productive series of the Kryvyi Rih basin Northern region. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2 (85), 28–36. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.85.04>

References

- Belevtsev, R.Ya. (1970). Metamorphic zoning of the Krivoy Rog basin. *Geological Journal*, 30, 4, 25–38. [in Ukrainian]
- Belik, D.M., Kutin, V.V., Reshetnyak, V.V. (1984). Zonality of different elements of the Krivoy Rog iron-ore suite. *News of the USSR Academy of Sciences. Ser. geol.*, 2, 79–85. [in Russian]
- Bespoyasko, E.O. (2004). Effect of mineral composition on the physical and technical properties of weathered ferruginous rocks of the Ingulets deposit (Kryvyi Rih basin). *Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyi Rih Technical University*, 1, 40–47. [in Ukrainian]
- Glazunov, S.N. (2005). OJSC Northern Mining and Processing Plant on the path of dynamic development. *Mining Journal*, 5, 27–29. [in Russian]
- Evtekhov, V.D. (1992). Genetic and applied mineralogy of sodium metasomatites in the ferruginous-siliceous formations of the Ukrainian shield (according to natural and experimental data). *Extended abstract of Doctor's thesis (Mineralogy, Crystallography): 04.00.20*. Lviv. [in Russian]
- Evtekhov, V.D., Dotsenko, V.D. (1979). On the magnetic properties of the magnetite of the Pervomaysky deposit of Krivbass. *Proceedings of the*

scientific and technical conference of the Krivoy Rog Mining Institute. Geological and mineralogical section. Krivoy Rog, 46–53. [in Russian]

Karpenko, S.V., Evtekhov, V.D. (2006). The ratio of the total iron content and the content of its soluble forms in the ores of the Annovskoye deposit (Krivoy Rog basin). *Geological and Mineralogical Bulletin of Kryvyi Rih Technical University*, 2 (16), 92–95. [in Russian]

Evtekhov, V.D., Karpenko, S.V., Yevtyekhova, A.V. (2009). Topomineralogy of the Saksagan series of the Gannivsky deposit of the Kryvyi Rih basin. *Notes from the Ukrainian Mineralogical Society*, 6, 77–84. [in Ukrainian]

Karpenko, S. (2008). Mineralogical zone of ferruginous horizons of Kryvyi Rih Annovskoye deposit. *Collection of abstracts of the All-Ukrainian scientific-practical conference. Kryvyi Rih*, 128–129.

Karpenko, S.V., Evtekhov, V.D., Evtekhova, A.V. (2009). Authigenic-metamorphogenic mineralogical and geochemical zoning of the productive stratum of the Annovskoye field (Krivoy Rog basin). *Scientific bulletin of NMU*, 3, 54–57. [in Russian]

Matkovsky, O., Pavlyshyn, V., Slyvko, E. (2009). Fundamentals of Mineralogy of Ukraine. Lviv: Publishing Center of LNU them. Ivan Franko. [in Ukrainian]

Pavlishin, V.I., Matkovskiy, O.I., Dovgij, S.O. (2003). Genesis of minerals. Kyiv. [in Ukrainian]

Pavlishin, V.I. (1984). Genetic and applied aspects of study about tipomorphism of minerals. *Mineralogical journal*, 5, 16–23. [in Russian]

Paranko, I.S. (1997). Formations and stratigraphy of the Krivoy Rog structure. *Information from the Academy of Mining Sciences of Ukraine*, 4, 54–58. [in Ukrainian]

Rakovich, F.I. (1983). Typomorphic properties of magnetites from ferrous-siliceous rocks and rich ores USH as an indicator of the conditions of education. *Geological journal*, 43, 5, 87–92. [in Russian]

Prušinskienė, S., Šiliauskas, L., Skridlaite, G. (2017). Varieties and chemical composition of magnetite in the Varėna Iron Ore Deposit. *Chemija*, 28 (1), 39–57.

Tikhliivets, S. (2017). Mineral composition of zones of contact of dikes of granite and rocks of iron-siliceous formation of the Krivoy Rog Basin. *Proceedings of the International Scientific Conference. "International Trends in Science and Technology". October 17, 2017, Warsaw, Poland*, 4–7.

Tikhliivets, S., Filenko, V. (2017). Mineralogy of sodium metasomatites of the Pervomayske deposit and their influence on quality of iron ore concentrate. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4 (79), 53–58.

Tikhliivets, S.V., Filenko, V.V. (2018). Morphological features of magnetite from productive series of the Kryvyi Rih basin Northern region. *Mineralogical collection*, 68, 58–61. [in Ukrainian]

Tikhliivets, S.V. (2019). Morphological features of magnetite and quartz from productive series of the Kryvyi Rih basin Northern region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv: Geology*, 2 (85), 28–36. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.85.04>

Chubarov, V.A., Evtekhov, V.D. (1996). Identification of mineral varieties and technological ore grades of Krivbass. *Mining Journal*, 11–12, 14–17 [in Russian]

Надійшла до редакції 04.06.2020

C. Тихливець, канд. геол. наук., доц.,
E-mail: tikhliivets.svetlana@gmail.com;
Криворізький національний університет,
вул. Пушкіна, 37, м. Кривий Ріг, 50002, Україна

ВАРІАТИВНІСТЬ ФІЗИЧНИХ І ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАГНЕТИТУ ТА КВАРЦУ ПІВНІЧНОГО РАЙОНУ КРИВОРІЗЬКОГО БАСЕЙНУ

Фізичні властивості мінералів є функцією їхнього хімічного складу, особливостей морфології й анатомії. На їхню варіативність впливають геологічні сингенетичні й епігенетичні процеси, які виявлені в межах залізрудних родовищ Криворізького басейну. Останній представлений дев'ятьма родовищами, які розробляються п'ятьма гірничозбагачувальними комбінатами. У Північному районі Криворізького басейну розташовані Ганнівське і Первомайське родовища. Продуктивна товща обох родовищ представлена бідними магнетитовими рудами п'ятого і шостого залізистих горизонтів, для яких характерний прояв аутигенно-метаморфогенної мінералогічної зональності.

Мета роботи обумовлена необхідністю детального вивчення закономірностей варіативності хімічного складу і фізичних властивостей породотвірних мінералів (магнетит і кварц) з урахуванням їхньої позиції в межах зональних рудних покладів.

Вивчення фізичних властивостей породотвірних мінералів проводилося за стандартними методиками з використанням мікротвердоміру, хімічний склад досліджувався шляхом виділення мономінеральних фракцій магнетиту і кварцу з різних за мінеральним складом руд метаморфічного і метасоматичного походження за допомогою магнітного сепаратора. Хімічні аналізи проводились у стандартизованій хімічній лабораторії. Статистичні дослідження виконувалися за допомогою комп'ютерних програм Excel та Corel Draw.

Наукова новизна. У результаті проведених досліджень виявлено характер варіативності хімічного складу, фізичних властивостей магнетиту та кварцу в розрізах метаморфогенних і метасоматично змінених рудних покладів залізрудних родовищ.

Практична значимість обумовлена необхідністю проведення, на основі вивчення фізико-хімічних властивостей головних породотвірних мінералів залізистих кварцитів, детального топомінералогічного дослідження продуктивної товщі залізрудних родовищ Криворізького басейну у зв'язку з проведенням робіт щодо уточнення мінералого-технологічної карти родовища, складання оптимальної схеми усереднення руд з метою підвищення ефективності використання природного технологічного потенціалу магнетитових кварцитів.

Ключові слова: Український щит, залізисто-кремніста формація, Криворізький басейн, залізисті кварцити, магнетит, кварц.

C. Тихливец, канд. геол. наук., доц.,
E-mail: tikhliivets.svetlana@gmail.com;
Криворожский национальный университет,
ул. Пушкина, 37, г. Кривой Рог, 50002, Украина

ВАРИАТИВНОСТЬ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАГНЕТИТА И КВАРЦА СЕВЕРНОГО РАЙОНА КРИВОРОЖСКОГО БАСЕЙНА

Физические свойства минералов являются функцией их химического состава, особенностей морфологии и анатомии. На их вариативность влияют геологические сингенетические и эпигенетические процессы, которые проявлены в пределах железорудных месторождений Криворожского бассейна. Последний представлен девятью месторождениями, которые разрабатываются пятью горнообогатительными комбинатами. В Северном районе Криворожского бассейна находятся Анновское и Первомайское месторождения. Продуктивная толща обоих месторождений представлена бедными магнетитовыми рудами пятого и шестого железистых горизонтов, для которых характерно проявление аутигенно-метаморфогенной минералогической зональности.

Цель работы обусловлена необходимостью детального изучения закономерностей вариативности химического состава и физических свойств породотвірних минералов (магнетит и кварц) с учетом их позиции в пределах зональных рудных залежей.

Изучение физических свойств минералов проводилось по стандартным методикам с использованием микротвердомера, химический состав исследовался путем выделения мономінеральних фракцій магнетита и кварца из разных по минеральному составу руд метаморфического и метасоматического происхождения с помощью магнитного сепаратора. Химические анализы проводились в стандартизированной химической лаборатории. Статистические исследования выполнялись с помощью компьютерных программ Excel и Corel Draw.

В результате проведенных исследований определен характер вариативности химического состава, физических свойств магнетита и кварца в разрезах метаморфогенных и метасоматических измененных рудных залежей железорудных месторождений.

Практическая значимость обусловлена необходимостью проведения, на основе изучения физико-химических свойств главных породотвірних минералов железистых кварцитов, детального топомінералогіческого исследования продуктивной толщи месторождений Криворожского бассейна в связи с проведением работ по уточнению их минералого-технологических карт, составлению оптимальных схем усреднения руд с целью повышения эффективности использования природного технологического потенциала магнетитовых кварцитов.

Ключевые слова: Украинский щит, железисто-кремнистая формація, Криворожский бассейн, железистые кварциты, магнетит, кварц.

ГЕОФІЗИКА

УДК 550.837

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.04>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.,
E-mail: 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,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, УкраїнаМЕТОДИЧНІ ПРИНЦИПИ ГЕОФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
КАРСТОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. М.І. Орлюком)*

Присвячено аналізу методичних принципів застосування геофізичних методів досліджень при вивченні карстонебезпечних територій. Наведено завдання, що ставляться при спеціалізованих дослідженнях карсту, та геофізичні методи їхнього вирішення. Виділено чотири етапи спеціалізованих досліджень карстонебезпечних територій: рекогносцирувально-методичний, пошуковий, розвідувальний та моніторинговий, визначено комплекси геофізичних методів для цих етапів.

Наголошено, що раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні карстових процесів визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки) з урахуванням: можливості виконання польових досліджень окремим геофізичним методом на даній ділянці; наявності диференціації порід за фізичними властивостями, що використовуються конкретним геофізичним методом; економічної ефективності застосування даного геофізичного методу.

Для прикладу наведено деякі результати геофізичних досліджень, виконаних у межах Любеньського родовища самородної сірки.

Ключові слова: інженерно-геофізичні дослідження, карстові процеси, електричний опір, електрозондування, комплекс геофізичних методів.

Постановка проблеми. На територіях, верхня частина розрізу (ВЧР) яких представлена гірськими породами, схильними до розвитку в них карсту (карбонати, сольові відклади), необхідно оцінювати ризик прояву небезпечних природних і природно-техногенних явищ і процесів, що становлять загрозу як для безпечного проживання людини, так і функціонування об'єктів господарської інфраструктури.

Карстові процеси широко розповсюджені на всій земній кулі. Вони зустрічаються скрізь, де карбонатні або інші розчинні породи виходять на поверхню землі, або залягають у ВЧР. За оцінками вчених-геологів понад 1/3 земної поверхні складені породами, що тією чи іншою мірою піддаються процесам карстоутворення. Ці розчинні гірські породи розвинені в межах усіх геоструктурних елементів – від стародавніх платформ до молодих геосинклінальних областей. Карбонатні, крейдяні, сульфатні й галогенні породи, схильні до карстування, широко розвинені також в Україні.

Слід зазначити, що карстові процеси належать до категорії найбільш небезпечних і широко розповсюджених екзогенних геологічних явищ. У зв'язку з тим, що активізація карстових процесів під впливом техногенної дії на них може призвести до катастрофічних наслідків, вони є постійною загрозою стосовно виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенно-природного і техногенного характеру.

Відомості про розвиток карстових явищ у товщах гірських порід становлять значний практичний інтерес і повинні враховуватися під час вирішення багатьох народно-господарських завдань, зокрема, при: освоєнні територій під цивільне, промислове, сільськогосподарське будівництво; пошуках і розвідці карбонатних порід і видобутку розчинної породи як корисної копалини; охороні пам'яток природи; створенні підземних сховищ нафти й газу; використанні в бальнеологічних і спортивно-туристських заходах.

Практика показує, що відсутність відомостей про закарстованість площ, а також нехтування можливими деформаціями геологічного середовища під час втручання людини можуть призводити до аварійної обстановки на промислових і цивільних об'єктах, що будуються й експлуатуються, а також при розробці родовищ корисних копалин.

Інтенсивна господарська діяльність людини різко активізує карстовий процес. Водночас вивченість районів розвитку карсту часто вкрай слабка і недостатня для оцінки наявної стійкості ґрунтів і прогнозу їхнього стану на перспективу.

Так, у районі м. Борислав розробка родовища калійних солей підземним способом без достатнього обсягу ціликів призвела до просідання ґрунту і деформації будівель в одному з районів міста. Енергетичний комплекс Рівненської АЕС побудований на території поширення нестійких крейдяних відкладів, тоді як у безпосередній близькості за даними геологічної зйомки широко розвинені базальти венду – міцний фундамент для будівель і споруд. На Солотвинському соляному руднику актуальними є завдання вивчення карстоутворення в покрівлі соляного купола і визначення положення його контакту із вмісними водонасиченими породами з метою уникнення розкриття їх підземними виробками. Отже, системне вивчення районів розвитку карсту в межах України стало життєво необхідним завданням.

Особливо важливим є вивчення карсту під час гідротехнічного будівництва, оскільки різноманітні порожнечі, що утворилися в тілі породного масиву, служать можливими шляхами підвищеної фільтрації води з водосховищ і каналів у тунелі, підземні споруди і шахти. Надзвичайно важливим є вивчення карсту при будівництві атомних електростанцій та інших великих інженерних споруд, коли проникність середовища набуває вирішального значення для обґрунтування можливості експлуатації екологічно небезпечних інженерних споруд.

Карстові порушення масивів порід при будівництві й експлуатації шахт визначають технологічні особливості проходки гірничих виробок і ускладнюють видобуток корисних копалин. За наявності карстових тріщин і пустот створюються умови для інтенсивного припливу в шахти підземних вод, що може призвести до масштабних аварій і катастроф. Крім того, карстові порожнини можуть бути вмістилищем для твердих, рідких і газоподібних корисних копалин (боксити, прісні й мінеральні підземні води, нафта, газ).

При вивченні карсту вирішуються дві групи тісно пов'язаних одного з одним завдань. До першої групи належать характеристика геолого-гідрогеологічної обстановки, яка сприяє розвитку процесів розчинення гірських порід, до другої – безпосереднє виявлення карстових порожнин і закарстованих зон, вивчення умов руху в них підземних вод, прогноз подальшого розвитку ерозійних, суфозійних і низки інших явищ.

За умовами формування, морфологією, літологічною приуроченістю, структурними особливостями, карст характеризується великим розмаїттям. У більшості випадків процес карстоутворення змінює фізичні властивості середовища, що дозволяє застосовувати для діагностики карсту геофізичні методи.

Отже, вивчення карстових процесів полягає у визначенні послідовних змін складу і властивостей гірських порід, що виражають ряд об'єктивних закономірностей, без знання яких неможливе досягнення головної мети – наукового прогнозу розвитку карстових процесів. Регіональне вивчення карстових процесів базується на аналізі інженерно-геологічних умов території та оцінці техногенного навантаження, історії її геологічного розвитку і кліматичних умов.

Геофізичні методи застосовуються для вивчення гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов ділянки, схильної до карсту, впливу їх на об'єкти господарської інфраструктури й екологічну обстановку. При цьому вивчаються закономірності часових змін різних геофізичних полів і параметрів середовища, які відображають особливості розвитку карстового процесу.

Об'єктивна оцінка карстонебезпечності територій потребує вирішення цілої низки завдань. Основними з них є: визначення геологічної будови верхньої частини розрізу, її складу, стану, властивостей, умов залягання та геометричних параметрів окремих товщ гірських порід, їхнього водонасичення і режиму підземних вод. Особливого значення набуває вивчення водотривів у ВЧР, що перекривають і підстилають горизонти порід, схильних до карсту, та визначення у них "фільтраційних вікон". Вирішення цих завдань з урахуванням матеріалів про гідрогеологічні та кліматичні умови району досліджень, даними про техногенні навантаження та історію розвитку карсту, служать основою для проведення розрахунків карстостійкості території.

Основою інформаційного комплексу при вирішенні зазначених завдань є детальні екогеофізичні дослідження ВЧР. Верхня частина розрізу – це приповерхнева частина геологічного середовища потужністю в десятки, рідше перші сотні метрів. Вона включає ґрунти, гірські породи, поверхневі, ґрунтові та підземні води, екзогенні фізико-геологічні явища (підтоплення, зсуви, карст тощо) і зазнає інтенсивного впливу екзогенних (атмосферних, поверхневих) і техногенних (фізико-хімічних, енергетичних) процесів. ВЧР характеризується інтенсивним проявом різноманітних факторів – як природних (різкою геологічною та петрофізичною неоднорідністю порід у просторі, часто також у часі), так і техногенних (максимальним проявом різних штучних впливів і фізич-

них полів). Особливістю ВЧР, що зазнає значних техногенних навантажень, є значна залежність усіх характеристик ґрунтів і порід від координат точок спостережень (як по латералі, так і у вертикальному напрямку). Різко змінюється у просторі й часі також поведінка різних геофізичних полів.

Прогноз розвитку карстових процесів базується на вивченні їхньої мікродинаміки, що знаходить відображення у спостережуваних геофізичних полях. Геофізичні методи досліджень дозволяють обстежити великі площі з детальною спостережень, яка недоступна для прямих методів інженерно-геологічних вишукувань з використанням буріння значної кількості свердловин. Варто зазначити, що масове буріння свердловин на території, схильної до карсту, може значно посилити карстові процеси і призвести до значних збитків для довкілля. Геофізичні дослідження дешевші за прямі методи і можуть бути виконані за короткий термін. Завдяки всебічному аналізу досліджуваної системи і масовому характеру спостережень геофізична інформація найбільш повно забезпечує можливість моделювання, яке є необхідним елементом інженерно-геологічного моніторингу карстових процесів.

При вивченні карсту моніторингові інженерно-геофізичні дослідження призначені для натурного спостереження за змінами геологічного середовища в зоні розвитку карстових процесів (Вижва, 2004; Вижва та ін., 2018; Vyzhva et al., 2019, 2020; Кузьменко та ін., 2012). Отримані геофізичні матеріали використовуються для прийняття науково-технічних рішень на проведення оптимальних захисних інженерно-технічних заходів. Необхідність та обов'язковість спеціалізованих геолого-геофізичних досліджень у районі карстонебезпечних територій з метою прогнозування імовірних екологічних змін довкілля випливає з численних прорахунків в обґрунтуванні будівництва та експлуатації різних промислових і соціальних об'єктів. При цьому важливим є математичне моделювання петрофізичних параметрів (Prodaivoda et al., 2000; Onanko et al., 2011).

Нехтування організацією моніторингових інженерно-геофізичних та екогеофізичних досліджень карстонебезпечних територій підвищує ризики катастрофічного розвитку в їхніх межах руйнівних і екологічно небезпечних процесів. Значна кількість аварій, що сталися внаслідок різкої активізації карстових процесів, призводить до погіршення екологічної обстановки, втрати матеріальних цінностей, а також до загибелі людей.

Аналіз публікацій за темою досліджень. Опубліковано низку робіт, присвячених застосуванню методів геофізики для вивчення карстових процесів (Вижва, 2004; Вижва та ін., 2017; 2018; Vyzhva et al., 2019, 2020; Кузьменко та ін., 2012; Огильви, 1990; Соколов, 1962; Шува-лов, 1983), проте систематичні спеціалізовані геофізичні дослідження, а тим більше геофізичний моніторинг, практично не проводяться. Для вивчення карсту переважно використовуються (за можливості) матеріали раніше виконаних на площі досліджень з метою геологічного картування та пошуків родовищ корисних копалин, геофізичних зйомок. Також слід зазначити, що вкрай незначну кількість публікацій на дану тему з практичними прикладами застосування геофізичних методів для вивчення карсту.

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Стаття присвячена висвітленню особливостей і методичних засад застосування геофізичних досліджень (в основному електрометричних) карстонебезпечних територій. Слід зазначити, що геофізичні дослідження територій, схильних до карсту, вимагають підвищеної точності польових вимірювань, застосування

статистичних методів обробки та нових підходів до інтерпретації польових геофізичних даних.

Мета досліджень – аналіз методичних принципів геофізичних досліджень при вивченні карсту.

Для прикладу, у статті також наведено результати комплексних геоелектричних досліджень верхньої частини розрізу карстонебезпечної ділянки на Любенському родовищі самородної сірки.

Фізико-геологічні передумови застосування геофізичних методів при вивченні карсту. Процес вилуговування і розчинення вапняків, доломітів, мергелів, гіпсів, ангідритів, крейди, кам'яної й калійної солей поверхневими і підземними водами супроводжується утворенням на денній поверхні воронок, провалів, а в товщі гірських порід – різноманітних тріщин, порожнеч, печер тощо. Поверхневі й підземні утворення, що виникли в результаті відмічених процесів, є карстом. Для виникнення карсту необхідна наявність: 1) розчинних порід; 2) проникності порід, що є наслідком переважно тектонічної тріщинуватості; 3) активного руху підземних вод, які розчиняють гірські породи і виносять продукти розчинення.

Загальна модель формування умов виникнення карсту дозволяє окреслити такі основні групи завдань при вивченні цього екзогенного фізико-геологічного явища: виділення і літологічна характеристика масивів, складених розчинними гірськими породами, включаючи оцінку вмісту нерозчинного осаду і наявності водотривких шарів; виявлення ефектів екранування водотривкими утвореннями, що перекривають розчинні породи; визначення положення місцевих і регіональних водотривків; картування давніх похованих ерозійних врізів, які є місцевими або регіональними базисами карстування; вивчення тектонічних структур, що сприяють розвитку карсту (у першу чергу розривних порушень і супутньої їм тріщинуватості). На всіх стадіях вирішення цих питань геофізичні методи відіграють першорядну роль і широко використовуються на практиці.

За основними фізичними властивостями породи, що зазнали карстування, як правило, істотно відрізняються від порід, які не піддалися карстовим процесам. Звідси випливає, що картування таких порід може виконуватися широким комплексом геофізичних методів. Вибір цього комплексу визначається розмірами досліджуваних масивів і геологічних тіл, що їх становлять, товщиною покривних відкладів, характером поверхневого рельєфу й іншими природними та техногенними факторами, які визначають шляхи вирішення поставлених завдань.

Найчастіше крутопадаючі межі закарстованих порід виділяються за допомогою електричного профілювання в поєднанні з електрозондуванням. У разі невеликої товщини покривних четвертинних відкладів ефективною є зйомка радіокомпараційним методом, заснованим на вимірюванні електромагнітного поля довгохвильових радіостанцій, зміни компонент якого вказують на положення контактів. У районах, де карстові породи залягають серед вивержених і метаморфічних порід, широко застосовується магнітна зйомка.

Для вивчення умов розвитку карстових процесів велике значення має виділення стійких до карстування включень і в першу чергу водонепроникних глинистих і глинисто-сланцевих пластів. Ці пласти поділяють карстовий масив на окремі, тією чи іншою мірою гідрогеологічно автономні блоки, у межах яких процеси вилуговування можуть мати багато специфічних особливостей. Крім того, установлено, що поблизу поверхні водонепроникних пластів розвиток карсту в розчинному масиві відбувається найбільш активно. Можливість виділення подібних водотривких пластів як з поверхні, так і у свердловинах, доведено результатами проведених геофізичних досліджень.

Характеристика масивів розчинних порід за вмістом глинистих фракцій може бути отримана також за значеннями їхнього питомого електричного опору ρ , потенціалів природного електричного поля U_n і гамма-активності I_γ . Відомо приклади встановлення кореляційних залежностей між цими параметрами і здатністю порід до карстування (Огільви, 1990; Шувалов, 1983).

Важливе значення має оцінка ролі водотривких утворень, які є екранами і перекривають розчинні породи. Чітко встановлена закономірність впливу товщини і складу покривних утворень на ступінь закарстованості території. Там, де цей покрив представлений водонепроникними відкладами, ускладнюється проникнення агресивних поверхневих вод у розчинний масив, отже, можливість утворення у ньому карстових порожнин є зниженою.

З метою вивчення покривних відкладів досить ефективними є електрометричні спостереження методом електропрофілювання, що дозволяють визначати ділянки розвитку глин, суглинків, супісків і пісків. Електропрофілювання частіше всього виконується за допомогою дворозносною установки Шлюмберже.

Доведено можливість картування покривних глинистих відкладів у карстонебезпечних районах за допомогою високоточної магнітної зйомки. Комплекс електрометричних методів, доповнений високоточною магнітною зйомкою, дозволяє, зокрема, виділити площі, у межах яких розчинні карбонатні породи мають глинистий екран, що не дозволяє інфільтрацію в них агресивних поверхневих вод.

Визначення положення місцевих і регіональних водотривків є одним з основних етапів формування динамічної моделі підземного водного потоку, що впливає на розчинні гірські породи. Водотриви, якими в більшості випадків є товщі глинистих порід, за своїми геофізичними характеристиками істотно відрізняються від порід, схильних до карсту. Для їхнього виділення у вертикальному розрізі в основному використовуються електричні зондування, оскільки сейсмометрія заломленими хвилями лише в деяких випадках дозволяє визначати положення нижньої межі розчинних порід.

У разі неглибокого карсту в нижній частині товщі розчинних порід утворюється горизонт тріщинно-карстових вод, які часто відрізняються підвищеною агресивністю. Цей горизонт сприяє найбільш інтенсивному розвитку порожнин різних розмірів і форм.

Розвиток карсту не може розглядатись без аналізу процесів зміни базису ерозії в різні геологічні епохи, про що найбільш обґрунтоване уявлення отримують зіставляючи потужності алювіальних відкладів у долинах прилеглих річок. Позиція давніх ерозійних врізів важлива для визначення як положення базису ерозії, так і зон можливого інтенсивного розвитку карстових явищ, які особливо часто приурочені до бортів похованих долин. Пошуки цих долин, їхнє простежування у плані й визначення потужності алювіальних відкладів – одне з важливих завдань геофізичних досліджень. Для його вирішення широко використовуються методи електрометрії, сейсмометрії та гравіметрії. Сприятливі для цього умови є тоді, коли потужність алювію визначається в долинах, врізаних у карбонатні корінні породи, оскільки останні за своїми електричними, сейсмічними та густинними властивостями характеризуються підвищеними показниками порівняно із заповнювальними їх відкладами.

Важливим завданням є також вивчення тектонічних структур, що сприяють розвитку карсту. Тріщинуватість порід уздовж розривних дислокацій забезпечує можливість більш інтенсивної циркуляції підземних вод у цих зонах, а отже, значно пришвидшує розвиток карстових процесів. У багатьох випадках доведено, що підземні карстові потоки, які перетинають ядра вододільних масивів,

розташованих між двома долинами, приурочені саме до зон розривних дислокацій. Виявлення подібних дислокацій – важливе завдання геофізичних досліджень. Ефективними при цьому, наприклад, є профільні електрометричні спостереження методами електропрофілювання.

Завдання визначення меж поширення карсту, виходячи з тектонічних передумов його розвитку, з успіхом вирішуються дистанційними методами. Виявлення систем лінійних елементів ландшафту (лінеamentів) сприяє вивченню спрямованості й динаміки прояву сучасних геологічних процесів та їхнього впливу на навколишнє середовище. На підставі такого аналізу можливе прогнозування зон активного карстоутворення. Із цією метою виконується статистичне зіставлення поверхневих регіональних проявів карсту з геологічними і геофізичними особливостями будови території. При цьому вибираються еталонні ділянки з найбільш інтенсивним проявом карсту та ділянки, де карстові процеси відсутні. Інтерпретація геолого-геофізичних матеріалів полягає в зіставленні сукупності ознак досліджуваної ділянки з невідомими карстопроявами і відповідних сумарних ознак еталонних ділянок. Якщо за обраними критеріями сукупність ознак для досліджуваної ділянки близька до сукупності ознак закарстованих областей, то приймається рішення про її належність до території активного карстопрояву. Сукупність ознак вибирається з урахуванням загальнотеоретичних передумов та узагальнення попереднього досвіду, що характеризує вплив різних чинників на розвиток карсту. Найбільш очевидними ознаками можуть бути: значення електричного опору, поздовжньої провідності й швидкості поширення сейсмічних хвиль у поверхневих відкладах, а також у породах що карстуються; дисперсія цих властивостей по площі; товщини окремих виділених пластів; положення рівня ґрунтових вод; наявність лінеamentів, виділених дистанційними методами і ряд інших.

Основним об'єктом вивчення при карстологічних дослідженнях є порушення (в окремих випадках порожнини), що виникають у поверхневих і глибинних частинах розчинного масиву. Вони можуть мати вигляд вертикальних, похилих або горизонтальних каналів, галерей і печер у самому різноманітному їхньому поєднанні, приурочених до одного або декількох структурних поверхів. До порожнин техногенного походження належать занедбані гірничі виробки, що залишилися після розробки корисних копалин або пройдені з іншою метою. Утворення пустот у масиві карстових порід часто супроводжується провалами й осіданням покрівлі покривних відкладів. Виникають воронки, провали та інші специфічні негативні форми рельєфу денної поверхні. Під карстовими порушеннями слід розуміти не тільки поодинокі форми, а й масиви розчинних порід, які характеризуються переважанням відкритої або заповненої пустотності. Сюди ж входять також зони інтенсивної тріщинуватості, коли тріщини значно розширені за рахунок розчинення. Реакція фізичних полів на всі ці порушення природної обстановки визначається в основному трьома чинниками: контрастністю фізичних властивостей заповнювача порушень і навколишніх порід; геометричними параметрами порушень (їхніми розмірами і глибиною залягання під землею поверхнею); характером розподілу й орієнтації порушень у досліджуваному масиві гірських порід.

Поверхневі карстові порожнини (воронки, сліпі яри, поля тощо) заповнюються зазвичай різними генетичними типами континентальних утворень. За рахунок вивітрювання, змиву і дії річкових потоків вони акумулюють матеріал, літологія і гранулометричний склад якого, а отже, і фізичні властивості, можуть змінюватися у досить широких межах. Контактні області між заповнювачем і

корінними породами часто є градієнтними. Неврахування цієї обставини під час визначення розмірів поверхневих карстових форм та їхньої глибини залягання можуть призвести до значних помилок. Суттєву роль відіграють такі природні явища, як атмосферні опади і танення снігу, що зумовлюють зниження питомого електричного опору (ПЕО) порід і, навпаки, сприяють підвищенню швидкості поширення поздовжніх сейсмічних хвиль (особливо в разі піщанистого і гравійного заповнювача).

Заповнювачем підземних карстових порожнин можуть бути: повітря, вода, лід, матеріал кори вивітрювання, стінок порожнин і різного роду перевідкладені утворення, властивості яких визначаються, головним чином, літологічним складом первинного матеріалу, ступенем і характером його переробки та умовами обводнення.

Фізичні властивості складного матеріалу різноманітного походження, що заповнює як поверхневі, так і підземні порожнини, практично завжди (за порівняно рідкісним винятком) відрізняються від властивостей навколишніх порід. Найбільша різноманітність характерна для можливих співвідношень електричних опорів між заповнювачем і вмисними породами. Якщо заповнювач у зоні аерації представлений сухим великоуламковим матеріалом з присутністю в ньому повітря і льоду, його питомий електричний опір характеризується більш високими значеннями порівняно з опором вмисних порід, тоді як у разі глинистого заповнювача його ПЕО буде нижчим, ніж опір вмисних порід. У зоні повного водонасичення практично за будь-якого складу заповнювача (крім льоду) спостерігаються знижені значення ПЕО (порожнини, заповнені водою чи глинистим матеріалом, характеризуються різко зниженим (іноді на 2–3 порядки) електричним опором порівняно із вмисними породами). У разі випадання із циркулюючих розчинів сульфідних мінералів відзначається підвищена здатність порід заповнювача до поляризації.

Швидкості поздовжніх сейсмічних хвиль у заповнювачі як у зоні аерації, так і в зоні водонасичення, нижчі, ніж у вмисних породах. Виняток становить печерний і тріщинний лід, швидкості в якому можуть бути вищі, ніж у вмисних породах.

Універсальним є співвідношення густини: заповнювач майже завжди характеризується зниженням цього параметра відносно навколишніх порід.

Магнітні властивості заповнювача поверхневих і підземних карстових пустот можуть мати в деяких випадках істотно підвищені показники, наприклад, коли в заповнювачі присутній пісок, що утворився за рахунок руйнування основних вивержених порід, або деякі різновиди бокситів. Найчастіше, однак, заповнювач за магнітними властивостями несуттєво виділяється серед вмисних порід, що під час картування карстових порушень зумовлює необхідність використання високочотних магнітометричних спостережень.

Завдання й комплекс геофізичних досліджень карсту. Аналіз аномалій, викликаних карстовими порушеннями, свідчить, що їхнє вивчення – завдання досить складне і вимагає в багатьох випадках комплексного підходу та спільного розгляду різних геофізичних полів. Спостереження здійснюються не тільки з поверхні землі, а й у свердловинах і гірничих виробках, іноді безпосередньо в доступних для проникнення карстових порожнинах (печерах). Ці роботи виконуються як з метою середньомасштабного картування на стадії техніко-економічного обґрунтування будівництва, так і під час великомасштабної зйомки під конкретні інженерні об'єкти. Крім того, виділяється детальне вивчення карстових процесів, пов'язане з оцінкою стійкості зведених споруд або визначенням їхнього впливу на підземне

будівництво та експлуатацію родовищ твердих корисних копалин. Важливими є також спелеологічні дослідження, які виконуються з метою господарського, туристичного або бальнеологічного освоєння печер природного походження. Вивчення процесів карстоутворення проводиться також при спеціалізованій карстологічній зйомці та під час великомасштабних (масштаб 1 : 25000–1 : 50000) і детальних (масштаб 1 : 1000–1 : 10000) інженерно-геологічних зйомок.

На різних стадіях зазначених робіт широко застосовуються геофізичні методи, які дозволяють вирішувати такі типові завдання:

- виділення в масиві гірських порід закарстованих і незакарстованих ділянок;
- вивчення гіпсометрії покрівлі порід, схильних до карсту;
- розчленування розрізу покривних відкладів з вивченням літології й фільтраційних властивостей водоносних горизонтів;
- визначення глибини залягання рівня ґрунтових вод;
- оцінка потужності товщі порід, схильних до карсту;
- виявлення і простеження ослаблених зон, що сприяють розвитку карсту;
- виявлення карстових порожнин, визначення їхнього просторового положення в розрізі й оцінка їхніх геометричних параметрів;
- визначення місць розвантаження карстових вод, установлення зв'язку підземного та поверхневого карсту і водотоків.

Як уже зазначалося, застосування геофізичних методів базується на відмінності фізичних властивостей закарстованих і незакарстованих порід. Методичний підхід до обґрунтування і постановки геофізичного комплексу визначається етапом робіт (регіональний, пошуковий, розвідувальний і моніторинговий), геологічним регіоном (платформа або складчаста область) і ступенем вивченості території.

Регіональний етап досліджень включає звичайний для геологічної зйомки комплекс методів, який дозволяє уточнювати особливості геологічної будови: магніторозвідка, гравіметрія, електророзвідка в різних модифікаціях, сейсморозвідка.

На етапі пошуків карстопроявів методика геофізичних досліджень визначається ступенем закарстованості й глибиною залягання порід, схильних до карсту. На ділянках слабого розвитку карсту і неглибокого залягання покрівлі схильних до карсту порід проводяться великомасштабні (масштаб 1 : 25000–1 : 50000) зйомки із застосуванням методів електропрофілювання (ЕП) і природного електричного поля (ПЕП) з мережею спостережень 250 × 25 м або 500 × 50 м. У районах із глибоким заляганням карсту переважна роль відводиться методу вертикального електричного зондування (ВЕЗ) з мережею точок спостережень 250 × 250 м і 500 × 500 м. Дослідження на окремих профілях доповнюються сейсморозвідкою і в окремих випадках високоточною гравіметрією та магнітометрією. У разі високого ступеня закарстованості території детальність досліджень збільшується до масштабу 1 : 10000–1 : 5000, відповідно густота спостережень досягає 100 × 100 м, 50 × 50 м і до складу робіт включають також кругові й хрестові ВЕЗ.

На етапі розвідки родовищ карбонатних порід і при детальних дослідженнях для оцінки закарстованості майданчиків, відведених під цивільне і промислове будівництво, виконуються детальні геофізичні дослідження масштабу 1 : 5000–1 : 1000 з мережею спостережень 25 × 10 м і 10 × 5 м – для ЕП, ПЕП, високоточної гравірозвідки та магніторозвідки, та 50 × 50 м або 25 × 25 м – для ВЕЗ і сейсмозондування. Отримані на даному етапі

матеріали забезпечують вирішення завдань з картування покрівлі схильних до карсту порід, виділення зон порушень і монолітів, виявлення карсту в покрівлі й усередині масиву, визначення розмірів і глибини залягання карсту, з'ясування гідрогеологічної ситуації. Вони є відправними для обґрунтування підрахунку запасів продуктивних покладів, обсягів закарстованих і розкритих порід або є основою вибору майданчиків для будівництва.

На етапі моніторингових досліджень виконуються режимні геофізичні спостереження за змінами геофізичних полів у часі, які пов'язані з динамікою розвитку карстових процесів. Крім того, контролюється ефективність проти-карстових інженерно-технічних заходів. Дослідження проводяться комплексом геофізичних методів на попередньо вибраних ключових профілях. Частота циклів геофізичних вимірювань визначається швидкістю розвитку карстових процесів і конкретною геолого-геофізичною обстановкою району досліджень. Комплексний аналіз матеріалів моніторингових спостережень дозволяє зробити прогноз розвитку карстових процесів, вносити корективи в ході виконання захисних інженерно-технічних заходів і контролювати їхню ефективність.

Основна роль при вивченні карстових явищ належить електрометричним наземним методам. Електричні зондування використовуються для вивчення карстового рельєфу покрівлі розчинних порід, їхнього розчленування за літологічними ознаками, виділення у розрізі тектонічних, тріщинуватих і закарстованих зон, визначення глибини залягання підземних вод і базису ерозії, вивчення карстової зональності, а також для вирішення багатьох інших завдань, пов'язаних з вертикальним розчленуванням розрізу.

Значна мінливість геоелектричного розрізу в карстових районах вимагає виконання зондувань з більш густою мережею спостережень, ніж у районах, де карст відсутній. Виходячи з досвіду робіт, можна вважати оптимальною відстань між електророзондуваннями 100 м.

В умовах інтенсивно закарстованих територій порушується плавний хід кривих ВЕЗ і спостерігаються значні розриви під час переходу з однієї приймальної лінії на іншу. Ця обставина так само, як і в разі вивчення зсувів, вимагає проведення кушових зондувань зі зміщеними на кілька метрів центрами установок і побудови синтезованих кривих за усередненими значеннями уявного опору ρ_u .

Основним способом безпосереднього виділення поверхневих і підземних карстових порушень є електричне профілювання. Спостереження мають характеризувати геологічну ситуацію на двох глибинах. На малих розносах отримують інформацію про товщу порід у межах зони аерації. На великих розносах живильної лінії отримують основну інформацію про породи в зоні повного водонасичення.

Розмір установок вибирають, виходячи з особливостей кривих рекогносцирувального електрондування, попередньо виконаного в різних точках обстежуваної ділянки. Детальне вивчення карстових порушень часто виконується за допомогою несиметричних установок (трёхелектродних або дипольних).

При вивченні карсту широко використовується також електропрофілювання способом серединних градієнтів (ЕП-СГ). Перевагою цього способу профілювання є знижений рівень хибних аномалій і більш висока, порівняно з іншими методами, продуктивність робіт. З позитивного боку зарекомендувало себе також комплексування ЕП-СГ та комбінованого і дипольного профілювань з дослідженнями методом природного електричного поля.

Для вивчення систем витягнутих карстових порушень і зон тріщинуватості застосовуються кругове вертикальне

електрозондування (КВЕЗ) та кругове електропрофілювання. Витягнутість отриманих полярних діаграм указує напрямок простягання карстових пустот і тріщин. Аналіз відношення великих осей полярних діаграм уявного опору до малих для різних розносів КВЕЗ дозволяє скласти уявлення про інтенсивність закарстованості або тріщинуватості масиву порід на різних глибинах. Досить інформативне зіставлення полярних діаграм з матеріалами, що характеризують вихід керна, а також з даними наливів у шурфи або відкачок із свердловин. Отримані результати можна екстраполювати на сусідні площі, у межах яких свердловини відсутні. Для глибокого карсту, розвиненого в потужних товщах розчинних порід, характерне помітне зменшення еліптичності діаграм, отриманих на тих розносах установок, на яких результати вимірів визначаються переважним впливом відкритої пористості підстиляючої товщі порід (нижче базису ерозії).

Кругові спостереження доцільно комбінувати з профільною зйомкою ділянки. Якщо на карті опорів, отриманої за результатами профілювання, намічаються закарстовані аномальні зони, то в їхніх межах виконуються кругові електрозондування, які не тільки уточнюють простягання панівної системи пустотності, а й дозволяють оцінювати ступінь її розвитку.

Відомі численні спроби підвищення чутливості електрометричних методів при вивченні закарстованих ділянок і визначенні положення окремих порушень, засновані на різного роду трансформаціях поля уявного електричного опору ρ_v . Із цією метою часто використовуються багатоелектродні (Вижва та ін., 2018; Модін у др., 1996, 2006), фокусувальні й диференціальні електрометричні установки (Сапужак, 1977).

Слід зазначити також високу ефективність методу зарядженого тіла (МЗТ) при вивченні закарстованих територій. Цей метод широко використовується в практиці гідрогеологічних досліджень. Карстова порожнина, заповнена водою і глинистим матеріалом, порівняно з високоомними вмісними породами є тілом із суттєво зниженим питомим опором. У зв'язку із цим при пропусканні через це тіло електричного струму його контактна поверхня (поверхня заповненої порожнини) є практично екіпотенціальною. Як наслідок, ізолінії потенціалу вимірюваного на поверхні землі електричного поля, створюваного стікаючим з контактної поверхні струмом, повторюють контури карстової порожнини. Максимальна концентрація ізоліній потенціалу спостерігається приблизно над проекцією меж порожнини на земну поверхню.

У разі витягнутих карстових порушень типу каналів, галерей і систем закарстованих тріщин використовується методика спостережень, заснована на вимірі градієнта потенціалу вздовж профілів, приблизно ортогональних передбачуваному простяганню досліджуваного об'єкта. У цьому випадку точка перетину графіка градієнта потенціалу з координатною віссю (лінією профілю) визначає положення осі порушення. Отже, досліджувана зона низьких опорів може бути простежена на значній відстані.

Метод зарядженого тіла включається в рекомендований комплекс геофізичних досліджень під час детального обстеження інтенсивно закарстованих територій з метою оцінки стійкості фундаментів інженерних споруд. Виходячи з досвіду геофізичних досліджень, використання методу зарядженого тіла рекомендується після завершення наземних геофізичних робіт, коли в загальних рисах намічено положення карстового порушення. У центральній його частині буриться свердловина, яка й дає можливість реалізувати метод зарядженого тіла.

Для вивчення карсту неглибокого залягання може застосовуватися метод радіолокаційного підповерхневого

зондування (РЛЗ, *ground-penetrating radar* (GPR)), заснований на випромінюванні високочастотних імпульсів електромагнітних хвиль і реєстрації сигналів, відбитих від різних об'єктів досліджуваного середовища (Владов і Старовойтов, 2004). Порівняно з іншими геофізичними методами радіолокаційний метод має високу роздільну здатність, яка визначається частотою зондувального сигналу. Водночас у зв'язку з високою частотою випромінюваного імпульсу (75–500 МГц) цей метод має порівняно незначну глибину досліджень, яка у відносно сприятливих високоомних середовищах становить перші десятки метрів.

Електрометричні методи за значним обсягом вирішуваних специфічних завдань, експресністю та можливістю їхнього виконання в складних геоморфологічних умовах є найбільш універсальними й ефективними при детальному вивченні закарстованих ділянок.

На сучасному етапі під час дослідження карсту широко застосовуються методи сейсмометрії. У разі проведення спостережень методом заломлених хвиль на закарстованих ділянках відзначається інтенсивне їхнє згасання, поглинання і розсіювання, що призводить до погіршення сейсмічного запису. Зазначені особливості є індикаторами і дають можливість фіксувати наявність порушеності в гірському масиві. Ця порушеність відображається у пов'язаних з нею явищах: зниженні граничних швидкостей поздовжніх і поперечних хвиль, зменшенні середніх швидкостей поширення хвиль у покриваючій карстові порушення товщі порід, формі годографів та низці інших ознак.

Найчастіше під час проведення польових спостережень застосовують поздовжнє безперервне профілювання за системою зустрічних і наганяльних взаємоув'язаних годографів. У зв'язку з характерною для закарстованих територій складністю сейсмогеологічної обстановки системи спостережень мають забезпечувати значні перекриття. Окремі завдання вирішуються методом сейсмічних зондувань.

Підвищення роздільної здатності сейсмометрії в карстових районах пов'язане із застосуванням методів, заснованих на генерації гармонійних збуджувальних пружні коливання сигналів. Застосування кореляційного принципу реєстрації та обробки даних дозволяє відокремлювати корисний сигнал від шумів і визначати час його пробігу.

У результаті відповідної інтерпретації простежується шлях пружної хвилі, що дає можливість будувати моделі, які характеризують умови залягання порід і наявність у них карстових порушень. Застосування вібраційної системи збудження пружних коливань дозволяє реалізувати режим накопичення корисних сигналів, що забезпечує вищу якість отримуваних експериментальних даних, а отже, і значно більшу інформативність методу, ніж класична сейсмометрія, заснована на генерації сигналу ударами.

Для виявлення карстових порушень гірських масивів і для вивчення фізико-механічних властивостей розчинних порід, що значно змінюються під впливом карстових процесів, можуть також застосовуватися сейсмоакустичні дослідження у свердловинах.

Для вивчення карстових процесів у деяких випадках застосовуються високоточні гравіметричні зйомки. Аналіз прояву карстових порушень у полі сили тяжіння свідчить про те, що за сучасної точності спостережень методи гравіметрії досить перспективні при вивченні карстової пустотності. Цьому сприяє також той факт, що часто спостерігається приуроченість основних областей розвитку карсту до зон тектонічної тріщинуватості, які відрізняються зниженою густиною. Особлива увага в разі гравіметричної зйомки на закарстованих територіях при-

діляється створенню густої мережі спостережень і високій точності вимірювань. При регіональній зйомці для виявлення локальних карстових структур точність визначення аномалій сили тяжіння в редукції Буге становить 0,08–0,1 мГал і вище. Детальну зйомку, метою якої є вивчення окремих карстових ділянок, виконують з більшою високою точністю ($\leq 0,04$ мГал).

При наземних дослідженнях карстових явищ в окремих випадках використовується також високоточна магнітометрія, термометрія, гамма-зйомка та деякі інші геофізичні методи.

Завданням детальних інженерно-геологічних досліджень на закарстованих територіях є необхідність не тільки планового визначення місць розташування карстових порушень, але й отримання відомостей про їхнє розповсюдження на глибину масиву, характер і геотехнічні властивості заповнювача і навколишніх порід. Особливо важлива така інформація при визначенні місць розташування потенційно-небезпечних промислових об'єктів, підземному будівництві та експлуатації родовищ корисних копалин. Ці завдання вирішуються шляхом різного роду спостережень у внутрішніх точках геологічного середовища. До них належать геофізичні дослідження у свердловинах, у навколосвердловинному і міжсвердловинному просторі, геофізичне обстеження гірничих виробок, просвічування міжвиробкових і міжпечерних ціликів і деякі інші спеціальні спостереження.

Геофізичні дослідження у свердловинах дають можливість: визначати структурну приуроченість карстових проявів; виділяти закарстовані й тріщинуваті інтервали з уточненням у розрізі положення окремих порожнин; оцінювати відносну й абсолютну пустотність порід; характеризувати склад, властивості й стан заповнювача порожнин; визначати глибину залягання базису ерозії; вивчати зональність тріщинно-карстових підземних вод, визначати їхню мінералізацію і динамічні характеристики; з'ясовувати структуру фізичних полів, властивих даному масиву.

Просторове положення та розміри карстових порожнин, які містяться у ціликах розчинних порід між свердловинами і гірничими виробками, визначаються різними геофізичними методами, що мають загальну назву "просвічування". Методи просвічування різноманітні як за характером застосовуваних фізичних полів, так і за технічними особливостями їхнього виконання.

На сучасному етапі при вивченні карстових порушень і моніторингу стану ґрунтів часто застосовують сейсмоакустичне просвічування (Дейнеко та ін., 2017). У цьому методі вимірюється час пробігу пружних хвиль між випромінювачем і приймачем, що розташовані в різних свердловинах (виробках). Реєстровані максимальні часи пробігу і низка інших ознак, що визначають аномальне проходження пружних коливань через цілик, дозволяють виявити порушення в міжсвердловинному просторі, оцінити їхню глибину залягання і геометричні параметри. Наявність навколо порушень розущільнених зон значно підвищує роздільну здатність методу.

З метою обстеження міжсвердловинного (міжвиробкового) простору застосовується також радіохвильове просвічування, у якому вивчаються динамічні особливості проходження високочастотного електромагнітного коливання (згенерованого випромінювачем) по міжсвердловинному (міжвиробковому) цілику від випромінювача до приймача, розташованих у різних свердловинах (виробках). На проходження в немагнітних середовищах електромагнітних коливань високої частоти сукупно впливають як електричний опір, так і діелектрична проникність середовища. Остання може змінюватися для заповнювача карстових порожнин від 1 (повітря) до 81

(вода). Змінюючи взаємне розташування випромінювача і приймача у свердловинах чи в гірничих виробках, визначають місце розташування порушення, його розміри і властивості заповнювача.

Висока роздільна здатність та інформативність геофізичних методів, застосовуваних для вивчення карстових процесів, доведена на багатьох прикладах у різних регіонах країни, зокрема на ділянках, що зазнають техногенного впливу. Основними перевагами геофізичних методів досліджень є оперативність, екологічна чистота і невелика вартість. В умовах закритої території та значної глибини залягання порід, схильних до карстування, геофізичні дослідження дозволяють раціональніше використовувати обсяги буріння. Останнє досить важливо, оскільки механічний розтин свердловиною цих утворень або з'єднання, у результаті буріння, водоносних горизонтів посилює (активізує) карстовий процес.

Експериментальні дослідження. Передкарпатський сірконосний басейн відкритий у 50-х рр. минулого століття. Він розташований у межах Волино-Подільської частини Східноєвропейської платформи, у смузі, яка прилягає до Зовнішньої зони Передкарпатського прогину. Сірконосний басейн простягається на 300 км завдовжки і 40–50 км завширшки. В його межах відкрито близько 20 родовищ сірки. Найбільші з них: Роздольське, Немирівське, Язівське, Любеньське, Сороківське, Гуменецьке, Жидачівське, Подорожнянське, Товмацьке. Для прикладу наведемо деякі результати геофізичних досліджень, виконаних на ділянці Любеньського родовища самородної сірки. Родовище розташоване на території Львівської області в північно-західній частині Передкарпатського сірконосного басейну. Завдання, поставлені перед геофізичними методами, включали два основні напрями досліджень – структурно-картувальний і карстологічний.

Структурно-картувальний напрям передбачав: оконтурювання гіпсо-карбонатних відкладів тираської світи верхнього тортону; визначення глибини і характеру залягання поверхні докосоївських відкладів; простеження тектонічних порушень; визначення потужності четвертинних відкладів і рельєфу корінного ложа.

Карстологічний напрям досліджень включав: виявлення зон закарстованості в сірконосних вапняках і гіпсоангідритах тираської світи; установа ділянок інфільтрації поверхневих і фільтрації підземних вод.

Успішному застосуванню геофізичних методів для вирішення цих завдань сприяли відповідні фізико-геологічні передумови. Основним об'єктом дослідження на даній ділянці була товща сульфатно-карбонатних відкладів тираської світи верхнього тортону, що становлять продуктивні сірчисті утворення. Ці відклади є добре розчинними здатними до карсту породами, і служать опорним геоелектричним горизонтом. Знизу їх підстеляють вапняки й пісковики нижнього тортону, які за фізичними параметрами не відрізняються від порід тираської світи. Перекривається цей опорний горизонт глинистою товщею косівської світи потужністю до 40 м, сарматськими піщано-глинистими відкладами потужністю від 10 м до 90 м і четвертинними відкладами з високою проникністю (супіски, піски, глини, торфовища) потужністю від 2,5 м до 40 м.

Осадкові породи становлять тут тришаровий геоелектричний розріз типу Н з контрастною зміною опорів (90–130; 5–25; 250–500 Ом·м), що дозволило впевнено картувати дві межі поділу – поверхню докосоївських відкладів і підшову четвертинних утворень. Закарстованість і тріщинуватість порід змінюють геоелектричний розріз, знижуючи опір шарів, що служить критерієм діагностики зон фільтрації й розвитку карсту (як правило, заповненого уламковим і глинистим матеріалом).

Основними факторами розвитку карсту є водонасичення надгіпсового водоносного горизонту метасоматичних вапняків і швидкість фільтрації розчинів між водоносними горизонтами.

Для вирішення геологічних завдань основна роль відведена методу ВЕЗ у площинному варіанті по мережі точок спостережень 500×200 м при деталізації до 250×100 м. На ділянках різкої зміни геоелектричних умов площинна зйомка ВЕЗ доповнювалася профільними спостереженнями з кроком 50–100 м. Розноси лінії живлення АВ становили від 300 м до 1000 м. У комплексі з методом ВЕЗ виконана також зйомка методом ПЕП по мережі 100×25 м.

У результаті комплексного аналізу отриманих геолого-геофізичних даних складено комплект робочих карт, які супроводжуються геолого-геофізичними розрізами по опорних профілях. Фрагменти найбільш інформативних карт показані на рис. 1–5.

У результаті аналізу даних електрометричних досліджень встановлено зв'язок значень мінімуму уявного опору кривих ВЕЗ $\rho_{y,min}$ з різною проникністю порід надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$). З використанням цих даних побудовано карту ізом $\rho_{y,min}$, фрагмент якої наведено на рис. 1. Ділянки, де значення $\rho_{y,min} > 20$ Ом·м, відповідають областям розвитку порід надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$) з підвищеною проникністю, а де $\rho_{y,min} < 20$ Ом·м – покривним породам з низькою проникністю.



Рис. 1. Фрагмент карти ізом $\rho_{y,min}$.

Умовні позначення: 1 – поле підвищених значень $\rho_{y,min}$ (відповідає проникним породам ($Q + N_{1,ks}$) з підвищеною проникністю); 2 – поле низьких значень $\rho_{y,min}$ (відповідає породам ($Q + N_{1,ks}$) з низькою проникністю); 3 – карст. Ізолінії потенціалу методу ПЕП: 4 – позитивні, 5 – негативні

При зіставленні даних ВЕЗ і буріння встановлено залежності між кутом нахилу правої асимптоти кривої ВЕЗ і потужністю закарстованих порід тираської світи, ступенем закарстованості й фільтраційними властивостями покривної товщі. Значення кута нахилу правої асимптоти кривої ВЕЗ у межах $35\text{--}45^\circ$ відповідають монолітним, а $10\text{--}35^\circ$ – тріщинуватим закарстованим породам тираської світи. Результати цього аналізу лягли в основу побудови карти кутів нахилу (α) асимптот кривих ВЕЗ і потужності закарстованих порід, фрагмент якої наведено на рис. 2.

На рис. 3 наведено фрагмент структурної карти опорного горизонту, побудованої за даними кількісної інтерпретації матеріалів ВЕЗ і результатів буріння. На ній винесені: ізогіпси покривлі відкладів тираської світи; контури поширення порід, схильних до карсту (гіпсоангідрити, вторинні вапняки, сірконосні вапняки); область відсутності відкладів косівської світи (водотриву); тектонічне порушення.

За даними кількісної інтерпретації ВЕЗ і матеріалів буріння побудована також карта ізопахіт надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$), фрагмент якої наведено на рис. 4. Карта характеризує товщину покривних теригенних четвертинних і неогенових відкладів. Результати комплексного аналізу отриманих геолого-геофізичних даних винесено на карту комплексної інтерпретації (карту закарстованості), фрагмент якої наведено на рис. 5.

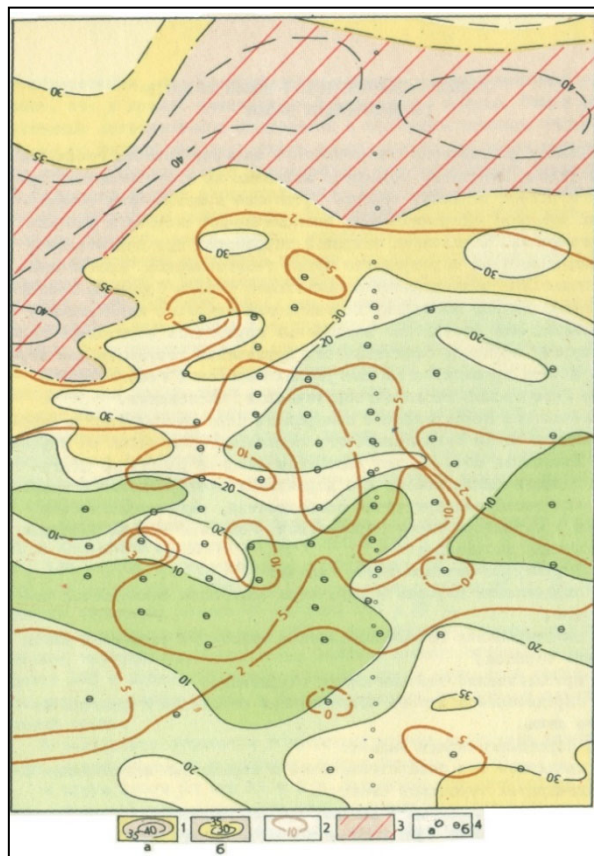


Рис. 2. Фрагмент карти кутів нахилу (α) асимптот кривих ВЕЗ і потужності закарстованих порід.

Умовні позначення: 1 – ізолінії кутів α : інтервал $35\text{--}45^\circ$ відповідає монолітним (а), $10\text{--}35^\circ$ – тріщинуватим закарстованим (б) породам тираської світи; 2 – ізопахіти закарстованих порід за даними буріння; 3 – зона відсутності карсту або його слабого розвитку; 4 – свердловини (а), у т.ч., які розкрили карст (б)

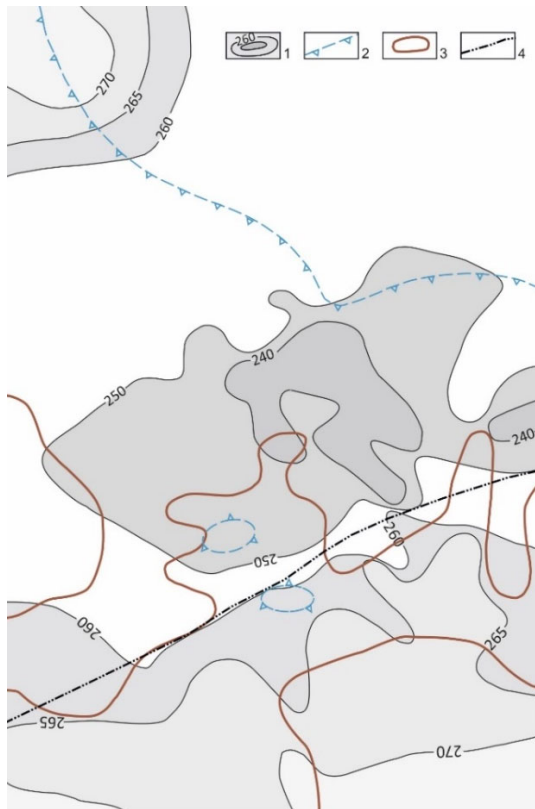


Рис. 3. Фрагмент структурної карти покрівлі опорного горизонту.

Умовні позначення: 1 – ізогіпси покрівлі відкладів тираської світи; 2 – контури поширення порід, схильних до карсту (гіпсоангідриди, вторинні вапняки, сірконосні вапняки); 3 – область відсутності відкладів косівської світи (водотриву); 4 – тектонічне порушення

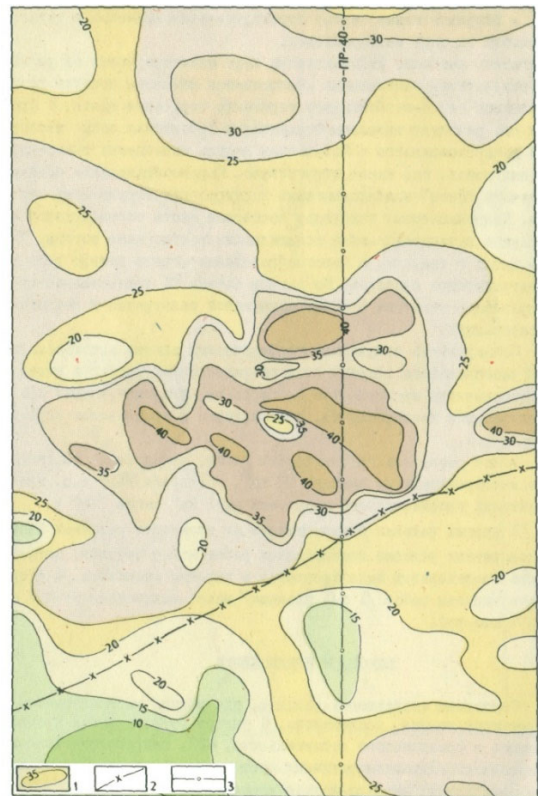


Рис. 4. Фрагмент карти ізопакіт надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$).

Умовні позначення: 1 – ізопакіти надкарстової теригенної товщі ($Q + N_{1,ks}$); 2 – тектонічне порушення; 3 – лінія геолого-геофізичного розрізу

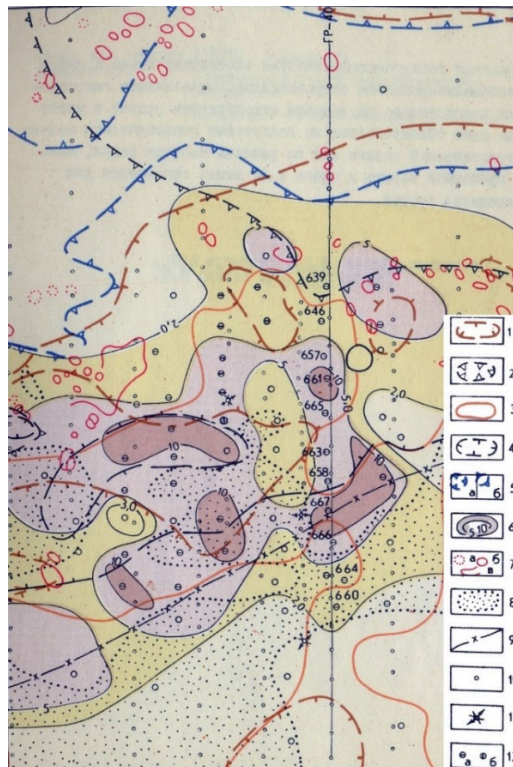


Рис. 5. Фрагмент карти закарстованості Любенської ділянки.

Умовні позначення: Контури поширення карсту порід за даними буріння: 1 – гіпсоангідриди; 2 – метасоматичні вапняки; 3 – сірконосні вапняки. Контури геологічних утворень за геофізичними даними: 4 – водопроникні породи перекривного чохла; 5 – гіпсокарбонатні породи тираської світи: а) закарстовані, б) незакарстовані; 6 – ізопакіти закарстованих порід (за даними буріння); 7 – карст: а) осідання, б) воронки, в) долини; 8 – зони інфільтрації поверхневих вод (підвищені значення уявного електричного опору при $AB = 9$ м); 9 – тектонічне порушення; 10 – пункти ВЕЗ; 11 – напрям тріщинуватості за даними кругових ВЕЗ; 12 – свердловини, у т.ч. що виявили карст: а) заповнений, б) порожнини

За результатами виконаних досліджень визначено контури поширення гіпсо-карбонатного горизонту тираської світи, виділено зони інтенсивної закарстованості та смуга монолітних гіпсокарбонатних порід, де карст відсутній. Карстоутворення в межах ділянки досліджень пов'язано з наявністю водопроникних "вікон" у надтираських теригенних відкладах, що служать водотривом. У місцях, де такі "вікна" відсутні, під водонепроникними відкладами косівської світи залягають монолітні незакарстовані підстильні розчинні породи. Слід зазначити, що в карстоутворенні відіграють важливу роль інфільтраційні процеси. За даними зйомки природного електричного поля встановлюється напрямок водотоку в зонах підвищеної фільтрації в теригенних породах.

Сукупність отриманих геофізичних даних використовується для раціонального ведення геолого-розвідувальних робіт і має довготривалу практичну цінність на наступних етапах при експлуатації родовища, а також промислового і цивільного будівництва в районі досліджень.

Висновки. На основі викладеного можна прийти до наступних висновків:

1. Для вивчення карстових процесів комплекс геофізичних методів, залежно від завдань і етапу досліджень, включає дистанційні електрометричні, сейсмометричні, еманційні, гравіметричні, магнітометричні, термометричні та каротажні дослідження. Серед них найбільш універсальними і ефективними за значним обсягом вирішуваних специфічних завдань при вивченні карстових ділянок є електрометричні методи. Виділяють чотири етапи досліджень: рекогносцирувальний, методичний, пошуковий, розвідувальний та моніторинговий. На кожному із цих етапів застосовується спеціалізований комплекс геофізичних методів.

2. Доцільність використання геофізичних методів для вивчення карсту не викликає сумніву. Водночас раціональний комплекс геофізичних методів при дослідженні карстових процесів визначається для кожної окремої природної обстановки (окремої ділянки) з урахуванням: можливості виконання польових досліджень окремим геофізичним методом на даній ділянці; наявності диференціації порід за фізичними властивостями, використовуваним конкретним геофізичним методом; економічної ефективності застосування геофізичного методу.

3. На ділянці Любеньського родовища самородної сірки, зважаючи на складний рельєф місцевості та економічну доцільність, для вивчення карсту застосовувався комплекс геоелектричних досліджень методами електрондування по мережі 500 × 200 м з деталізацією до 250 × 100 м і природного електричного поля по мережі 100 × 25 м. Геоелектричні дослідження показали високу ефективність. За результатами цих досліджень складений комплект карт геофізичних параметрів, що дозволяють оцінити карстову обстановку на ділянці родовища.

4. Надалі, з накопиченням досвіду геофізичних досліджень карсту, цілком реальною є можливість вирішення більш складних завдань, пов'язаних з геофізичним вивченням динаміки карстових процесів шляхом запровадження геофізичного каналу моніторингу. Застосування раціонального комплексу геофізичних досліджень та організація геофізичного каналу моніторингу карстонебезпечних ділянок є необхідними й економічно виправданими засобами для ефективного планування і виконання захисних протикарстових інженерно-технічних заходів з метою уникнення екологічних аварій та катастроф.

Список використаних джерел

Вижва, С.А. (2004). Геофізичний моніторинг небезпечних геологічних процесів. Київ: "Обрій".

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Онищук, І.І., Рева, М.В. (2018). Інженерна геофізика. Підручник. Київ: ВПЦ "Київський університет".

Вижва, С.А., Онищук, В.І., Іванченко, К.П., Рева, М.В., Дейнеко С.І. (2017). Дослідження геологічної будови територій розміщення гідротехнічних споруд за допомогою геофізичних методів (на прикладі ГЕС "Сенже", Екваторіальна Гвінея). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77, 36–42.

Владов, М.Л., Старовойтов, А.В. (2004). Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ.

Дейнеко, С., Вижва, С., Нестеренко, Г., Берневек, А., Івашченко, С. (2017). Сейсмомоноіторинговий стану ґрунтів Дністровського шхли (у зоні розміщення напірно-стаціонарного вузла). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(78), 30–35.

Кузьменко, Е.Д., Чепурний, І.В., Чалий, П.П. (2012). Довгострокове прогнозування провално-просадкових проявів карсту. Івано-Франківськ: Вид-во ІФТУНГ.

Модін, І.Н., Бобачев, А.А., Горбунов, А.А., Шевнін, В.А. (2006). Електротомографія методом сопроотивлений і вызваної поляризації. *Приборы и системы разведочной геофизики*, 2, 14–17.

Модін, І.Н., Ігнатова, І.Д., Шевнін, В.А., Перваго, Е.В. (1996). Векторная съемка в методе сопроотивлений. *Вестник Московского ун-та. Сер. 4. Геология*, 1, 88–91.

Огильви, А.А. (1990). Основы инженерной геофизики. Москва: Недра, 324–378.

Сапужак, Я.С. (1977). Дивергентная электроразведка. Киев: Наукова думка.

Соколов, Д.С. (1962). Основные условия развития карста. Москва: Госгеолтехиздат.

Шувалов, В.М. (1983). Исследование закарстованных территорий и подземных полостей методами электроразведки. Пермь: Изд. ПГУ.

Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.

Prodayvoda, 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., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabaturova, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *18th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066>.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabaturova, O. (2019). The mapping of submerged (flooding) lands by geophysical methods. *XIII International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 2019 November 12–15, Kyiv, Ukraine*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903225>.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabaturova, O. (2020). Application of geophysical methods in the study of karst. *19th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects, 2020 May 11–14, Kyiv, Ukraine*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo123>.

References

Deineko, S., Vyzhva, S., Nesterenko, G., Bernevек, A., Ivashchenko, S. (2017). Seismoacoustic monitoring of the state of the soils of the Dniestrian slope (in the zone of accommodation of the pressure-stationary unit). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 78, 30–35. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.78.04>. [In Ukrainian]

Kuzmenko, E.D., Chepurnyi, I.V., Chalyi, P.P. (2012). The long-term forecast of the development of the breakdown and subsidence phenomena of karst. Monograph. Ivano-Frankivsk: IFNTUOG Press. [In Ukrainian]

Modin, I.N., Bobachev, A.A., Horbunov, A.A., Shevniin, V.A. (2006). Electrical tomography by the resistivity method and induced polarization. *Devices and Systems of Exploration Geophysics*, 2, 14–17. [in Russian]

Modin, I.N., Ihnatova, I.D., Shevniin, V.A., Pervaho, E.V. (1996). Vector survey in resistivity method. *Moscow University Geology Bulletin*, 1, 88–91. [in Russian]

Ogilvi, A.A. (1990). Fundamentals of engineering geophysics. Moscow: Nedra. [in Russian]

Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.

Prodayvoda, 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.

Sapuzhak, Ya.S. (1977). Divergent electric prospecting. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]

Shuvalov, V.M. (1983). Exploration of karst territories and underground cavities using electrical prospecting methods. Perm: Perm State University Press. [in Russian]

Sokolov, D.S. (1962). Basic conditions for the development of karst. Moscow: Gosgeoltekhizdat. [in Russian]

Vladov, M.L., Starovoitov, A.V. (2004). Introduction to georadiolocation. Moscow: Moscow University Press. [in Russian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Ivanchenko, K., Onyshchuk, I., Reva, M., & Deineko, S. (2017). Research of geologic structure of territories of hydrotechnical systems allocation by means of geophysical methods (using "Senzhe" HPP as an example, Equatorial Guinea). *Visnyk of Taras*

Shevchenko National University of Kyiv. *Geology*, 77, 36–42. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.04>. [In Ukrainian]

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). Application of geophysical methods in the study of landslides. *18th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 2019 May 13–16, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902066>.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2019). The mapping of submerged (flooding) lands by geophysical methods. *XIII International Scientific Conference: Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, 2019 November 12–15, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903225>.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2020). Application of geophysical methods in the study of karst. *19th International Conference; Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects*, 2020 May 11–14, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo123>

Vyzhva, S.A. (2004). Geophysical monitoring of dangerous geological processes. Kyiv: "Obrii". [In Ukrainian]

Vyzhva, S.A., Onyshchuk, V.I., Onyshchuk, I.I., & Reva, M.V. (2018). Engineering geophysics. Kyiv: Kyiv University Publishing. [In Ukrainian]

Надійшла до редколегії 27.09.2020

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: oiivan1@ukr.net;

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

O. Shabatura, PhD (Geol.),

E-mail: dard@ukr.net;

Taras Shevchenko National University of Kyiv,

Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF GEOPHYSICAL STUDIES OF KARST DANGEROUS TERRITORIES

The article is devoted to the analysis of the methodological principles of applying geophysical research methods in the study of karst-hazardous territories. The tasks that are posed in specialized studies of karst and geophysical methods for their solution are given. Four stages of specialized studies of karst-hazardous territories are identified: reconnaissance-methodological, prospecting, reconnaissance and monitoring. The set of geophysical methods for the development of these stages are determined.

It is noted that a rational set of geophysical methods in the study of karst processes is determined for each individual natural environment (individual site). The possibility of performing field research by a separate geophysical method in this area, the presence of differentiation in rocks according to their physical properties which are used by a specific geophysical method and economic efficiency of the application of this geophysical method were taken into account.

As an example, some results of geophysical studies carried out in the framework of the Lyubensky field of native sulfur are given.

Keywords: engineering and geophysical research, karst processes, electrical resistance, electrical sounding, a set of geophysical methods.

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. сотр.,

E-mail: oiivan1@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

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ КАРСТООПАСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Посвящено анализу методических принципов применения геофизических методов исследований при изучении карстоопасных территорий. Рассмотрены задачи, которые ставятся при специализированных исследованиях карста, и геофизические методы их решения. Выделены четыре этапа специализированных исследований карстоопасных территорий: рекогносцировочно-методический, поисковый, разведывательный и мониторинговый; определены комплексы геофизических методов для этих этапов.

Отмечено, что рациональный комплекс геофизических методов при исследовании карстовых процессов определяется для каждой отдельной природной обстановки (отдельного участка) с учетом: возможности выполнения полевых исследований отдельным геофизическим методом на данном участке; наличии дифференциации пород по физическим свойствам, используемым конкретным геофизическим методом; экономической эффективности применения данного геофизического метода.

Для примера приведены некоторые результаты геофизических исследований, выполненных на площади Любенского месторождения самородной серы.

Ключевые слова: инженерно-геофизические исследования, карстовые процессы, электрическое сопротивление, электрозондирование, комплекс геофизических методов.

УДК 550.832.5

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.05>

М. Бондаренко, канд. геол. наук, ст. наук. співроб.;
В. Кулик, канд. фіз.-мат. наук, пров. наук. співроб.;
E-mail: vkulyk@igph.kiev.ua;
О. Дмитренко, пров. інж.;
Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,
пр. Акад. Палладіна, 32, Київ-142, 03680, Україна;
С. Данилів, директор, ТОВ "Укрспецприбор",
E-mail: danyliv.sm@gmail.com;
вул. Западницька, 5, м. Київ, 04123, Україна;
О. Стасів, директор, ТОВ "Укрспецгеологія",
E-mail: office@usg.lg.ua;
вул. Шевченка, 30, с. Терешки, Полтавська обл., 38762, Україна;
В. Кармазенко, директор,
E-mail: v.karmazenko@gmail.com;
ТОВ "Київський завод «Геофізприлад»"

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГУСТИНИ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ КАРОТАЖІ НА КАБЕЛІ ТА В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ

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

Представлено результати створення повномасштабних фізичних моделей гірських порід для калібрування комбінованих приладів радіоактивного каротажу (РК), складовою частиною якого є густинний гамма-гамма каротаж (ГГК). Побудовано чотири комплекти моделей для різних задач каротажу.

1. Моделі пористих карбонатних пластів-колекторів, перетнуті свердловиною (діаметр 216 мм), укомплектовані змінними імітаторами обсадних колон (146 мм і 168 мм) із цементним кільцем і насосно-компресорними трубами. Моделі, призначені для калібрування приладів РК на кабелі при дослідженні розрізу необсаджених і обсаджених нафтогазових свердловин.

2. Моделі гірських порід різної густини із свердловиною (160 мм), укомплектовані змінними бурильними трубами (120 мм, 108 мм, 89 мм). Моделі призначені для калібрування приладів ГГК для каротажу в процесі буріння горизонтальних нафтогазових свердловин.

3. Універсальні моделі пористих карбонатних пластів-колекторів, перетнуті свердловинами трьох діаметрів (200 мм, 160 мм, 125 мм). Призначення моделей – калібрування приладів РК на кабелі для дослідження розрізу необсаджених і обсаджених нафтогазових свердловин і приладів РК для каротажу в процесі буріння горизонтальних нафтогазових свердловин.

4. Моделі приповерхневих гірських порід різної густини, обладнані щільно прилеглою до породи сталевією трубою діаметром 51 мм. Призначення моделей – калібрування приладів ГГК для дослідження приповерхневих гірських порід при вирішенні завдань: інженерно-геологічних, сейсмічного мікрорайонування, екологічних та ін.

Фізичні моделі розроблено співробітниками Інституту геофізики НАН України і реалізовано разом з організаціями-партнерами. Постійне використання моделей обумовлено активними роботами, які ведуться Інститутом геофізики разом із партнерами зі створення апаратурно-методичних комплексів радіоактивного каротажу, до складу яких входить ГГК.

Для нових приладів ГГК наведено градувальні залежності та калібрувальні функції, отримані на створених фізичних моделях, а також приклади визначення густини в різних свердловинних умовах при вирішенні науково-виробничих завдань.

Ключові слова: фізичні моделі гірських порід, нафтогазові та приповерхневі свердловини, каротаж на кабелі, необсаджений і обсаджений свердловини, каротаж у процесі буріння, бурильна труба, гамма-гамма каротаж, калібрувальна функція, густина гірських порід.

Вступ. Густинний гамма-гамма каротаж є одним з основних методів дослідження розрізу нафтогазових і приповерхневих свердловин (інженерно-геологічних, сейсмічного мікрорайонування, екологічних) (Звольський, 1980; Інструкція..., 2004; Кузнецов и Поляченко, 1990; Ферронский и др., 1977; Adolph et al., 2005; Ellis and Singer, 2008). Густина гірських порід, яку визначають за ГГК, є важливим самостійним петрофізичним параметром. Водночас вона виступає проміжною величиною, яку використовують (у комплексі з результатами інших методів каротажу) для оцінки літології, загальної пористості, характеру насичення та ін.

У промислово-геофізичній практиці ГГК для визначення густини порід спочатку використовувався в необсаджених свердловинах. Актуальним напрямом для ГГК є дослідження нафтогазових колекторів через обсадку (Ellis and Markley, 2007; The Cased Hole Analysis Tool, 2019). Відносно новим напрямом є використання ГГК у складі модуля РК для каротажу в процесі буріння (англ. logging while drilling (LWD)) (Adolph et al., 2005; Ellis and Singer, 2008).

В Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України (ІГФ) разом з партнерськими організаціями (ТОВ "Київський завод «Геофізприлад»", ТОВ "Укрспецприбор") розвинуто новий підхід до створення апаратурно-методичних комплексів радіоактивного каротажу (АМК РК) у складі гамма-каротажу, нейтрон-нейтронного, нейтрон-гамма і гамма-гамма каротажу. АМК РК призначені для геофізичних

досліджень колекторів у необсаджених і обсаджених (у т.ч. за наявності насосно-компресорної труби (НКТ)) нафтогазових свердловинах; для каротажу в процесі буріння нафтогазових свердловин; для визначення параметрів гірських порід приповерхневих гірських порід (Бондаренко та ін., 2019; Bondarenko et al., 2018; Kulyk and Bondarenko, 2016).

Первинною величиною, яку безпосередньо реєструють детектори приладів ГГК, є швидкість лічби імпульсів I . Сучасні прилади ГГК є в основному двозондовими (2ГГК). При цьому з метою зменшення впливу низьких факторів як інтерпретаційного параметра служить відношення показань меншого зонда (МЗ) до більшого (БЗ): $B = I_{\text{МЗ}}/I_{\text{БЗ}}$. (Інструкція..., 2004; Кузнецов и Поляченко, 1990), а для виключення окремих факторів – спеціальні методики, наприклад кросплоти "spine and ribs" (Ellis and Singer, 2008).

Перехід від інтерпретаційного параметра ГГК до густини здійснюється за допомогою калібрувальної функції (КФ). Оптимальним для отримання КФ є використання повномасштабних фізичних моделей гірських порід з реальною геометрією. Такі моделі відтворюють пласти гірських порід з певною густиною, перетнуті свердловиною (Блюменцев и др., 1991; Лобанков, 2016). При цьому, виконуючи калібрування приладу ГГК, доцільно встановлювати зв'язок показань з густиною пористого пласта, насиченого водою, оскільки відносно атомного номера до атомної маси водень різко відрізняється від інших

елементів. Це дозволяє відразу врахувати аномальні властивості водневмісної речовини в загальному об'ємі гірської породи (Лобанков, 2016; Ellis and Singer, 2008).

Актуальність роботи. У країнах, які належать до лідерів каротажного приладобудування і сервісу, існують давні традиції створення центрів для метрологічного забезпечення геофізичної свердловинної апаратури.

У США під егідою American Petroleum Institute діє Калібрувальний центр для ядерного каротажу, де збудовано ряд повномасштабних фізичних моделей пластів-колекторів (Belknap et al., 1978). Цей ряд моделей прийнятий за базовий для геофізичних фірм США. Тут прилади ГГК калібрують у чистому водонасиченому вапняку різної пористості (густини).

У Росії ще з радянських часів існує кілька метрологічних центрів, де розроблено й атестовано державні стандарти зразки у вигляді фізичних моделей карбонатних гірських порід різної пористості (густини) для калібрування апаратури РК (ВНИИЯГГ (м. Раменське), ВНИИГИС (м. Октябрьський), ВНИИНПГ (м. Уфа)) (Лобанков, 2016), побудовано моделі в компаніях "ТНГ-Груп" (м. Бугульма) (Закиров и др., 2009), "Тюменьпрогеофизика", "Пермнефтегеофизика" та багатьох інших (Лобанков, 2008). Нині працюють спеціалізовані підприємства ("Урал-Гео" (м. Уфа), "ТюменьГеоТехСтандарт" (м. Тюмень)) з виготовлення фізичних моделей пластів-колекторів для великих каротажних фірм (Лобанков, 2008, 2016).

Подібні центри існують у Польщі, Франції, Болгарії та інших країнах. Однак очевидно, що з деяких причин використання українськими приладобудівними і каротажними компаніями зарубіжних метрологічних центрів практично неможливе.

До унікальної, розробленої ще за часів СРСР, технології дослідження приповерхневих гірських порід на основі використання приладів радіоактивного каротажу ВПГР-1 і ППГР-1 у свердловинах, створених віброударним способом, входить комплект алюмінієво-плексигласових імітаторів густини і вологості. Цей комплект служить для отримання градувальних залежностей ГГК (прилад ППГР-1) і нейтрон-нейтронного каротажу (прилад ВПГР-1). В Україні така технологія активно використовується ДП "Енергопроект" (Дейнеко, 2007; Звольський, 1980). Однак стандартна методика калібрування з використанням алюмінієво-плексигласових імітаторів має недоліки, зокрема не дозволяє врахувати особливості визначення вологості в зоні аерації (змінна пористість і різне заповнення пор водою).

У зв'язку з активними розробленнями АМК РК для дослідження розрізів нафтогазових свердловин (ІГФ разом із ТОВ "Укрспецприбор" і ТОВ "Київський завод «Геофізприлад»"), а також приповерхневих свердловин, необхідно постійно виконувати дослідно-конструкторські, експериментальні та метрологічні роботи на фізичних моделях пластів. Такий комплекс робіт доцільно виконувати на власних метрологічних майданчиках.

В Україні ІГФ є єдиною організацією, яка займається розробкою і спорудженням фізичних моделей гірських порід для виконання комплексу робіт з приладами РК. На початку 2000-х рр. така робота була розпочата спільно з ДКБ Геофізичного приладобудування (м. Київ) (Прушко та ін., 2005), однак через припинення існування останнього фізичні моделі були втрачені.

Створення фізичних моделей гірських порід.

В останні роки для дослідно-конструкторських та експериментальних робіт з новими АМК РК для їхнього метрологічного забезпечення в ІГФ розроблено і разом з організаціями-партнерами (ТОВ "Укрспецприбор", ТОВ "Київський завод «Геофізприлад»", ТОВ "Укрспецгеологія", ДП "Енергопроект") споруджено чотири комплекти повномасштабних фізичних моделей гірських порід. При цьому для ГГК враховано такі фактори.

1) Для нафтогазових колекторів фізичні моделі мають охоплювати густину в діапазоні $\sim 1,5 \div 3,0 \text{ г/см}^3$ (Лобанков, 2016; Ellis and Singer, 2008), а для приповерхневих піщано-глинистих гірських порід – $\sim 1,4 \div 2,4 \text{ г/см}^3$ (Ферронский и др., 1977).

2) Похибка визначення густини є сумою апаратурної похибки та похибок, які вносять неоднорідність і товщина проміжного середовища між приладом і породою, потужність джерела γ -квантів, швидкість каротажу, потужність пласта тощо. Допустима похибка вимірювання за ГГК густини нафтогазових колекторів визначається вимогами до похибки їхньої пористості. Сумарна похибка зазвичай встановлюється не більше $\pm 0,03 \text{ г/см}^3$, що в перерахунку на пористість становить не більше $\pm 2 \%$ абс. (Хаматдинов, 2014; Ellis and Singer, 2008). Для приповерхневих гірських порід похибка вимірювань густини не повинна перевищувати $\pm 0,05 \text{ г/см}^3$ (Ферронский и др., 1977).

Моделі колекторів для необсаджених і обсаджених свердловин. Для калібрування приладів РК на кабелі (WL, англ. wireline logging – каротаж на кабелі), призначених для досліджень у необсаджених і обсаджених нафтогазових свердловинах, ІГФ разом ТОВ "Київський завод «Геофізприлад»" створили повномасштабні фізичні моделі пористих карбонатних пластів-колекторів (Звольський та ін., 2008). Для робіт з приладами WL-ГГК використовуються такі моделі:

1. Прісна вода: об'ємна густина $\delta = 1,00 \text{ г/см}^3$.
2. Мінералізована вода: $\delta = 1,1 \text{ г/см}^3$, $C_{NaCl} \sim 150 \text{ г/л}$.
3. Мармурова крихта однієї фракції: об'ємна густина сухої моделі $\delta_{с.п.} = 1,70 \text{ г/см}^3$, водонасиченої моделі $\delta_{в.п.} = 2,05 \text{ г/см}^3$, пористість $k_p = 37 \%$.
4. Мармурова крихта двох різних фракцій: $\delta_{с.п.} = 2,25 \text{ г/см}^3$, $\delta_{в.п.} = 2,45 \text{ г/см}^3$, $k_p = 20 \%$ (рис. 1, а).
5. Мармуровий блок: об'ємна густина $\delta = 2,70 \text{ г/см}^3$, $k_p \approx 2 \%$.

Моделі споруджено в бетонних баках висотою 2,0 м і діаметром 1,5 м. По центру моделі – необсаджена свердловина діаметром 216 мм. Моделі обладнано змінними імітаторами обсаджених колон (сталеві труби із цементним кільцем) 146 мм і 168 мм (рис. 1, б), а також НКТ різного діаметра.



Рис. 1. а – модель карбонатного пласта, $\delta_{в.п.} = 2,45 \text{ г/см}^3$, $k_p = 20 \%$; б – імітатори обсаджених колон із цементним кільцем для калібрування приладів WL-РК

Моделі пластів для каротажу в процесі буріння.

Для калібрування приладу ГГК, який входить до складу модуля для каротажу в процесі буріння LWD-MPK-48 (Бондаренко та ін., 2019), в ІГФ разом з ТОВ "Укрспецприбор" створено комплект повномасштабних фізичних моделей водонасичених гірських порід різної густини. Комплект складається з таких моделей:

1. Прісна вода: $\delta = 1,0 \text{ г/см}^3$; висота моделі $H = 1,2 \text{ м}$, діаметр $D = 1 \text{ м}$.
2. Водонасичений кварцовий пісок: $\delta = 1,8 \text{ г/см}^3$, $H = 1,2 \text{ м}$, $D = 0,9 \text{ м}$ (рис. 2).
3. Водонасичена суміш кварцового піску і мармурової крихти: $\delta = 2,3 \text{ г/см}^3$, $H = 0,95 \text{ м}$, $D = 0,9 \text{ м}$.
4. Водонасичена суміш кварцового піску і бариту (BaSO_4): $\delta = 2,9 \text{ г/см}^3$, $H = 0,85 \text{ м}$, $D = 0,56 \text{ м}$.



Рис. 2. Модель пласта піскови́ка ($\delta = 1,8 \text{ г/см}^3$) з бурильною трубою 120 x 25 для калібрування приладів LWD-ГГК

Моделі споруджено у сталевих баках. Розміри баків можуть бути різними у зв'язку з тим, що глибини дослідження ГГК і вплив крайових ефектів зменшуються з ростом густини гірської породи. Достатність розмірів, наведених вище моделей для використовуваного нами на моделях джерела γ -квантів ^{60}Co ($1,2 \times 10^7 \text{ Бк}$, $2,4 \times 10^7 \text{ ч/с}$) і довжин зондів ($\sim 10 \div 50 \text{ см}$), підтверджена експериментально.

Моделі обладнані свердловиною, яка сформована за допомогою пластикової труби із зовнішнім діаметром 160 мм і товщиною 2 мм. Така свердловина відповідає діаметру долота 156 мм (6 1/8"), яке найбільш часто використовують при бурінні горизонтальних відгалужень нафтогазових свердловин. Моделі обладнані змінними бурильними трубами: БТ 120 x 25 (зовнішній діаметр 120 мм, товщина стінки 25 мм), БТ 108 x 25, БТ 89 x 12.

Універсальні моделі гірських порід. Призначення моделей – калібрування приладів WL-PK для необсаджених і обсаджених нафтогазових свердловин і приладів LWD-PK для горизонтальних нафтогазових свердловин. Універсальні повномасштабні фізичні моделі пористих карбонатних пластів-колекторів розроблено в ІГФ на основі способу (Звольський та ін., 2008) і побудовано разом із ТОВ "Укрспецгеологія" на метрологічному майданчику останнього.

Комплект складається з таких моделей:

1. Прісна вода: об'ємна густина $\delta = 1,00 \text{ г/см}^3$.
2. Вода змінної мінералізації.
3. Мармурова крихта однієї фракції: $\delta_{\text{с.п.}} = 1,70 \text{ г/см}^3$, $\delta_{\text{в.п.}} = 2,09 \text{ г/см}^3$, пористість $k_n = 39,0 \%$.
4. Мармурова крихта двох різних фракцій: $\delta_{\text{с.п.}} = 1,97 \text{ г/см}^3$, $\delta_{\text{в.п.}} = 2,26 \text{ г/см}^3$, $k_n = 29,0 \%$.
5. Мармурова крихта трьох різних фракцій: $\delta_{\text{с.п.}} = 2,20 \text{ г/см}^3$, $\delta_{\text{в.п.}} = 2,41 \text{ г/см}^3$, $k_n = 21,0 \%$ (рис. 3).
- 6.1–6.3. Мармуровий блок: об'ємна густина $\delta = 2,75 \text{ г/см}^3$, $k_n \approx 2 \%$.

Особливістю насипних моделей 3–5 є розміщення їх у баках великого діаметра (2,40 м), що дозволяє ство-

рити в кожній з моделей три свердловини різного діаметра (200 мм, 160 мм, 125 мм). При цьому виключено взаємний вплив свердловин і вплив крайових ефектів при калібруванні приладів РК. Висота моделей – 1,80 м.



Рис. 3. Універсальна модель карбонатного пласта $\delta_{\text{с.п.}} = 2,20 \text{ г/см}^3$, $\delta_{\text{в.п.}} = 2,41 \text{ г/см}^3$, $k_n = 21,0 \%$ із трьома свердловинами (200 мм, 160 мм, 125 мм) для калібрування приладів WL-PK і LWD-PK

Монолітні моделі 6.1–6.3 представлені трьома окремими мармуровими блоками, що також дозволило створити три свердловини різного діаметра (200 мм, 160 мм, 125 мм).

Моделі укомплектовано змінними імітаторами обсаджених колон, а також НКТ різного діаметра, та бурильними трубами відповідного діаметра.

Моделі гірських порід для приповерхневих досліджень. Для калібрування приладів ГГК для дослідження приповерхневих гірських порід (NSL, *англ.* near-surface logging – приповерхневий каротаж) (Bondarenko et al., 2018) в ІГФ створено комплект фізичних моделей приповерхневих гірських порід різної густини. До комплекту входять такі моделі:

1. Прісна вода: $\delta = 1,00 \text{ г/см}^3$.
2. Кварцовий пісок: $\delta = 1,51 \text{ г/см}^3$.
3. Водонасичений кварцовий пісок: $\delta = 1,82 \text{ г/см}^3$.
4. Суміш кварцового піску та мармурової крихти: $\delta = 2,12 \text{ г/см}^3$ (рис. 4).

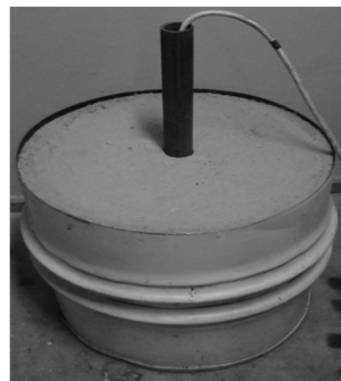


Рис. 4. Модель гірської породи ($\delta = 2,12 \text{ г/см}^3$) з обсадною трубою 51 мм для калібрування приладів NSL-ГГК

Моделі приповерхневих гірських порід споруджено в сталевих баках з $H = 0,85 \text{ м}$ і $D = 0,56 \text{ м}$. Таких розмірів моделей достатньо для використовуваних нами в приладах NSL-ГГК джерела γ -квантів ^{137}Cs ($6 \times 10^6 \text{ Бк}$, $5 \times 10^6 \text{ ч/с}$) і довжини зонда ($\sim 30 \text{ см}$).

По осі ємності встановлена (знімна) сталеві труба із зовнішнім діаметром 51 мм і товщиною стінки 5,5 мм, яка щільно прилягає до породи. Така геометрія свердловини відповідає технології віброударного створення свердловин у приповерхневих гірських породах (Звольський, 1980).

Наукова складова розробки.

Описані вище насипні (виготовлені на основі мармурової крихти, кварцового піску) фізичні моделі є реалізацією оригінального способу, захищеного патентом на винахід (Звольський та ін., 2008).

Зазвичай насипні фізичні моделі будують з використанням металевої або бетонної труби-імітатора свердловини, яка утримує стінки свердловини від руйнування та одночасно імітує необсадженою свердловину (Лобанков, 2016; Карпов, 2004). Основними недоліками такого підходу є: неконтрольований вплив матеріалу і товщини стінок труби, що імітує свердловину, на показання приладу ГГК і вплив відхилення від породи (на величину товщини стінки труби) приладу, притиснутого до стінки. Іншими недоліками є неможливість зміни флюїду, що заповнює пори моделі, нестабільність властивостей (пористості, загальної густини) у часі.

Згідно із запропонованим способом для формування необсадженої свердловини по осі моделі тимчасово встановлюють трубу із зовнішнім діаметром, що дорівнює діаметру свердловини, та коаксіальний тонкостінний циліндр. Діаметр циліндра перевищує діаметр зазначеної труби на $\sim 2 \div 5$ см, залежно від діаметра свердловини. Простір між трубою і циліндром заповнюють заданою (для досягнення запланованих густини і пористості) кількістю суміші насипного матеріалу з достатньою для скріплення його окремих частинок кількістю цементу високої марки (< 10 % ваг.). Таким чином створюють міцну стінку (необсадженої) свердловини. Простір між циліндром і стінкою ємності моделі заповнюють заданою кількістю насипного матеріалу з невеликою (~ 2 % ваг.) домішкою цементу для забезпечення стабільності в часі густини і пористості моделі. Модель будують пошарово, поступово піднімаючи формуючий циліндр.

Сформована описаним чином зцементована стінка свердловини практично не відрізняється за своїми фільтраційно-ємнісними параметрами та густиною від основного об'єму моделі. Вона дозволяє вільно проникати флюїду із свердловини в тіло моделі й навпаки, змінювати флюїд, і в той же час має достатню міцність для утримання насипного матеріалу з урахуванням незначного тиску в латеральному напрямку.

Створені нами моделі для калібрування приладів на кабелі та універсальні моделі обладнано зумфом. Він служить для видалення флюїду, який заповнює пори моделі й свердловину, може використовуватися для промивки моделі й заповнення її флюїдом іншої мінералізації, використовується при калібруванні приладів великої довжини.

Для імітації необсадженої свердловини із флюїдом, склад якого відрізняється від складу порового флюїду, виготовлено тонкостінний (~ 2 мм) алюмінієвий стакан з діаметром, близьким до діаметра свердловини. Стакан

може бути наповнений флюїдом заданого складу (прісна чи мінералізована вода, буровий розчин, повітря).

Для імітації обсадженої свердловини виготовлено імітатори обсаджених колон (рис. 1, б): стальна труба із закритим нижнім торцем, щільно оточена цементним кільцем із зовнішнім діаметром, близьким до діаметра необсадженої свердловини. Колона може бути наповнена флюїдом заданого складу і мінералізації.

Побудовані моделі використовуються для калібрування приладів ГГК (у складі розроблених нами апаратурно-методичних комплексів РК), призначених, зокрема, для актуальних напрямів промислової геофізики – дослідження нафтогазових колекторів через обсадку, каротаж у процесі буріння.

Результати калібрування приладів ГГК на створених фізичних моделях.

При розробці метрологічного забезпечення приладів РК розрізняють градувальну залежність і калібрувальну функцію (КФ). Градувальною є залежність вихідного сигналу (показань) приладу від петрофізичного параметра. Зазвичай таку залежність отримують за результатами вимірювань на фізичних моделях, що є найбільш адекватним підходом для метрологічного забезпечення.

КФ є оберненою функцією від градувальної залежності й зазвичай представляється найбільш простими апроксимаційними формулами. Згідно із КФ обчислюють значення шуканого петрофізичного параметра за показаннями апаратури при інтерпретації каротажних вимірювань. Для приладів РК здебільшого отримують індивідуальну КФ для кожного екземпляра однотипної апаратури (Лобанков, 2016). Існує інший підхід – використання єдиної КФ для всієї сукупності однотипних приладів. Однак останній вимагає значної роботи з уніфікації приладів даної серії й на сьогодні майже не застосовується.

На рис. 5–6 представлені градувальні залежності й калібрувальні функції (у вигляді формул) для розроблених нами приладів ГГК, які отримані на описаних вище повномасштабних фізичних моделях. На рис. 5 – для двозондового приладу WL-2ГГК-42 (діаметр приладу 42 мм) у необсаджених свердловинах (НС) різного діаметра (рис. 5, а), у свердловині 216 мм (рис. 5, б) без обсадки і в обсаджених колонах із цементним кільцем (ОК) і за наявності НКТ. На рис. 6, а – для приладу LWD-2ГГК-48 з різними бурильними трубами (БТ); на рис. 6, б – для однозондового приладу NSL-1ГГК-30 в НС і за наявності сталеві (СТ).

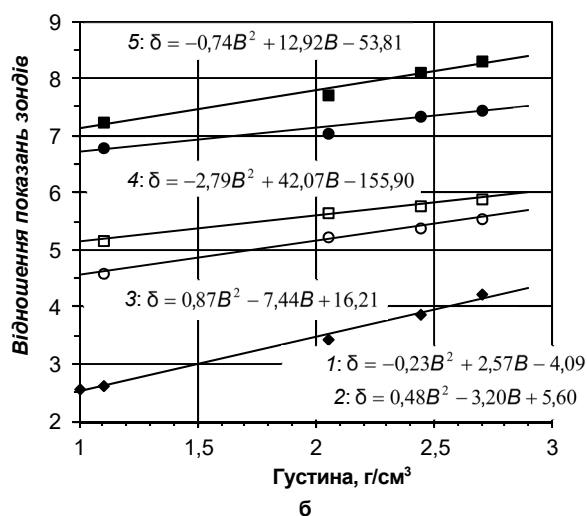
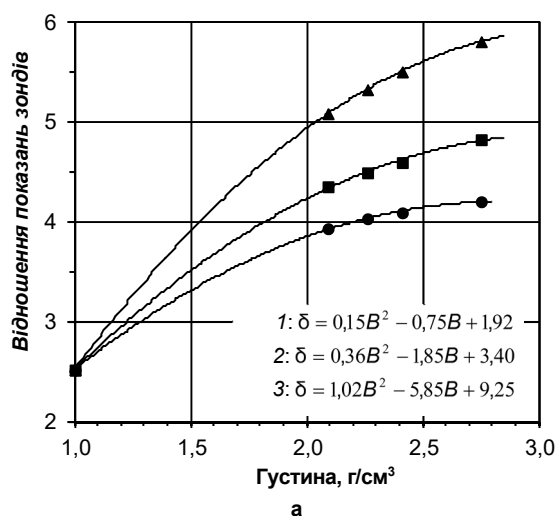


Рис. 5. Градувальні залежності й відповідні калібрувальні функції для приладу WL-2ГГК-42: а – НС: 1 – $d_{\text{св}} = 120$ мм, 2 – 160 мм, 3 – 200 мм; б – свердловина 216 мм: 1 – НС, 2 – ОК ($d_{\text{кол}} = 168$ мм), 3 – ОК (146 мм), 4 – ОК (168 мм) + НКТ (73 мм), 5 – ОК (146 мм) + НКТ (73 мм)

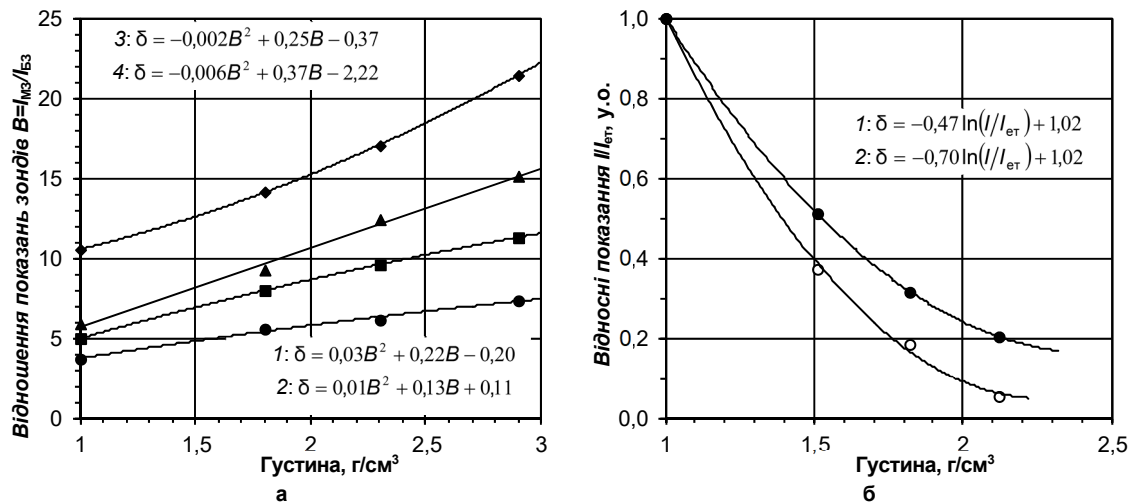


Рис. 6. Градувальні залежності ГГК і відповідні калібрувальні функції:

а – прилад LWD-2ГГК-48 у свердловині 160 мм: 1 – НС, 2 – БТ ($d_{\text{БТ}} = 89$ мм), 3 – БТ (108 мм), 4 – БТ (120 мм);
б – прилад NSL-1ГГК-30: 1 – НС (51 мм), 2 – СТ (51 мм)

З рис. 5–6 видно, що створені комплекти моделей дозволяють отримати градувальні залежності й відповідні калібрувальні функції приладів ГГК у робочому діапазоні густини гірських порід і для основних свердловинних умов, які зустрічаються у практиці промислової та приповерхневої геофізики. **Приклади визначення густини за ГГК.** Отримані на описаних вище моделях калібрувальні функції ГГК застосовані при вирішенні науково-виробничих завдань з використанням розроблених нами АМК РК. На рис. 7 представлено приклади визначення густини за ГГК на основі отриманих калібрувальних функцій в різних свердловинних умовах:

– рис. 7, а: густина згідно з приладом WL-2ГГК-42 в обсаджений свердловині ($d_{\text{св}} = 216$ мм, $d_{\text{кол}} = 168$ мм) на Скоробагачівському нафтогазоконденсатному родовищі (півн.-зах. частина приосьової зони ДДЗ);
– рис. 7, б: густина за приладом LWD-2ГГК-48 у процесі буріння горизонтальної свердловини ($d_{\text{св}} = 152$ мм, $d_{\text{БТ}} = 120$ мм) на Селюхівському нафтовому родовищі (півн.-зах. частина південної прибортової зони ДДЗ);
– рис. 7, в: густина за приладом NSL-1ГГК-30 у приповерхневій свердловині за наявності сталеної труби ($d_{\text{СТ}} = 51$ мм) на будівельному майданчику (м. Київ).

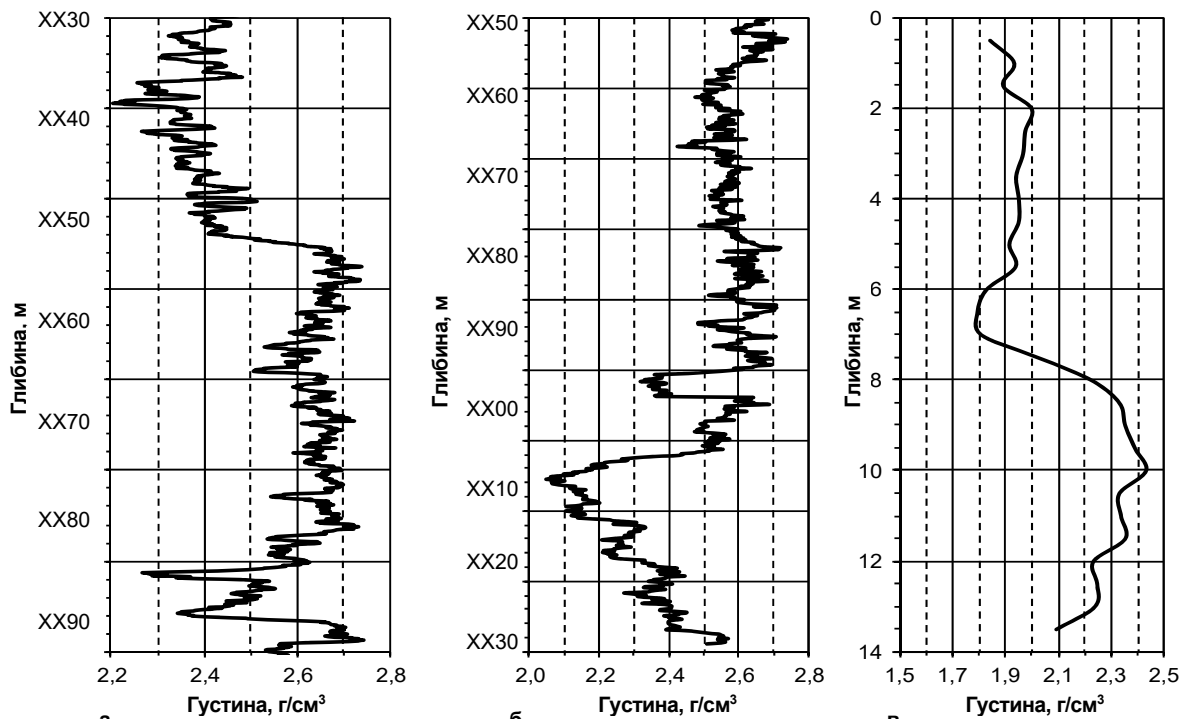


Рис. 7. Результати визначення густини за ГГК у свердловинах із сталеною трубою

а – обсаджена нафтогазова свердловина ($d_{\text{св}} = 216$ мм, $d_{\text{кол}} = 168$ мм), прилад WL-2ГГК-42;
б – каротаж у процесі буріння нафтової свердловини ($d_{\text{св}} = 152$ мм, $d_{\text{БТ}} = 120$ мм), прилад LWD-2ГГК-48;
в – приповерхнева свердловина ($d_{\text{СТ}} = 51$ мм), прилад NSL-1ГГК-30

Рис. 7 демонструє достатньо високу чутливість розроблених приладів ГГК до густини за різних свердловинних умов вимірювань за наявності сталених труб. Калібрувальні функції, отримані на основі вимірювань у побудованих фізичних моделях, дозволяють визначати

кількісні значення густини гірських порід при вирішенні практичних задач.

Напрямки подальшого розвитку досліджень. Актуальною задачею, яка виникла при науково-виробничих свердловинних вимірюваннях з використанням розробленого

нами АМК РК для LWD через цільні бурильні труби (Бондаренко та ін., 2019), є оцінка наявності і розміру каверн у стінці свердловини. Для вирішення цієї задачі нами розробляється спеціальний гамма-гамма-каверномір для умов LWD. Іншою задачею при використанні приладу LWD-2ГГК-48 є врахування номінальної густини бурового розчину та густини бурового розчину, зашламованого частинками розбурюваної гірської породи.

Для вирішення цих задач нами будуть розроблені й побудовані фізичні моделі зі свердловинами, в яких створені каверни різного розміру; виготовлено суміші, які імітують бурові розчини різної густини (від 1,05 г/см³ для чистих до ~1,5 г/см³ і більше для зашламованих бурових розчинів). Такі моделі дозволять відкалібрувати розроблюваний гамма-гамма-каверномір, удосконалити методику врахування впливу на показання приладу LWD-2ГГК-48 густини бурового розчину.

Побудовані фізичні моделі дозволяють змінювати насичуючий пори флюїд, комбінувати заповнення свердловини і пор моделі різними флюїдами. Це дає можливість оцінити вплив на показання приладів РК ефекту газонасичення, дослідити вплив води з різною мінералізацією тощо. Такі моделі є важливою складовою для розробки методик визначення характеру насичення і коефіцієнта нафтогазонасиченості колекторів.

З метою використання приладу NSL-1ГГК-30 для розв'язання екологічних завдань приповерхневої геофізики актуальним є створення фізичних моделей техногенних гірських порід, які імітують золівдали теплових електростанцій, хвостосховища залізрудних та інших гірничо-збагачувальних комбінатів.

Висновки. 1. В Інституті геофізики НАН України у співробітництві з організаціями-партнерами накопичено значний успішний досвід побудови фізичних моделей гірських порід для калібрування приладів ГГК та РК загальною для різних свердловинних умов.

2. Створені на даний період моделі охоплюють основне коло завдань, для яких застосовується комплекс РК, у т.ч. ГГК: каротаж на кабелі в нафтогазових свердловинах (необсаджених, обсаджених, обсаджених за наявності НКТ), каротаж у процесі буріння нафтогазових свердловин, каротаж у приповерхневих свердловинах.

3. Моделі активно використовуються при дослідно-конструкторських, експериментальних і метрологічних роботах з новими пристроями РК, у т.ч. ГГК, які створюються в ІГФ разом із партнерами.

4. Отримані на побудованих фізичних моделях калібрувальні функції ГГК показали свою ефективність на практиці при інтерпретації результатів: каротажу в обсаджених нафтогазових свердловинах, каротажу в процесі буріння горизонтальних нафтогазових свердловин, каротажу приповерхневих свердловин.

5. Розроблені та такі, що перебувають у розробці АМК РК та їхнє інтерпретаційно-методичне забезпечення (у т.ч. для ГГК), призначені для визначення розширеної сукупності петрофізичних параметрів гірських порід (нафтогазові карбонатні й теригенні колектори, приповерхневі піщано-глинисті породи та ін.), успішно застосовуються при вирішенні актуальних практичних завдань.

Список використаних джерел

- Бондаренко, М., Кулик, В., Євстахевич, З., Данилів, С., Зіненко, В., Лось, М. (2019). Апаратурно-методичний комплекс для визначення параметрів нафтогазових колекторів в процесі буріння горизонтальних свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 87(4), 20–25.
- Блюменцев, А.М., Калистратов, Г.А., Лобанков, В.М., Цирульников, В.П. (1991). Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин. Москва: Недра.
- Дейнеко, С.І. (2007). Системний моніторинг за станом небезпечних геологічних процесів на території діючих енергетичних об'єктів (на прикладі Рівненської АЕС) : автореф. дис. ... канд. геол. наук. Київський національний університет ім. Т. Шевченка. Київ.
- Закиров, Р.З., Кириллов, А.А., Воронков, Л.Н. (2009). Метрологическое обеспечение аппаратуры радиоактивного каротажа в ООО "ТНГ-Групп". *НТБ Каротажник*, 3(180), 78–84.

Звольский, С.Т. (1980). Гамма-методы измерения объемной массы дисперсных грунтов и донных отложений. Москва: Атомиздат.

Звольський, С.Т., Кулик, В.В., Кармазенко, В.В., Кетов, А.Ю., Рибак, В.І., Сніжко, Ю.О. (2008) Спосіб виготовлення фізичних моделей пластів-колекторів, перетнутих свердловиною. *Патент України на винахід № 84604*. ІГФ НАНУ.

Инструкция по проведению плотностного гамма-гамма каротажа аппаратурой серии СГПЛ и обработке результатов измерений. (2004). ООО "Нефтегазгеофизика". Тверь. Отримано з http://www.karotazh.ru/sites/default/files/files/instr_sgp.pdf

Карпов, Т.Ю. (2004). Технология построения моделей горных пород нефтегазовых скважин для калибровки аппаратуры нейтрон-нейтронного каротажа. *Дис. ... канд. техн. наук*. Уральская гос. горно-геол. академия. Екатеринбург.

Кузнецов, О.Л., Поляченко, А.Л. (ред.). (1990). Скважинная ядерная геофизика. Справочник геофизика. 2-е изд. Москва: Недра.

Лобанков, В.М. (2016). Метрологическое обеспечение в промышленной геофизике: Учебное пособие. Уфа : Изд-во УГНТУ.

Лобанков, В.М. (2008). Развитие системы метрологического обеспечения геофизических исследований в нефтегазовых скважинах. *Автореф. дис. ... д-ра техн. наук*. ОАО НПФ "Геофизика". Уфа.

Прушко, В.Р., Кулик, В.В., Челокян, Р.С., Звольский, С.Т. (2005). Спосіб виготовлення фізичних моделей пластів гірських порід. *Патент України на винахід № 63112*. ІГФ НАНУ.

Ферронский, В.И., Данилин, А.Н., Дубинчук, В.Т., Гончаров, В.С., Сеletzкий, Ю.Б. (1977). Радиоизотопные методы исследования в инженерной геологии и гидрогеологии. 2-е изд. Москва: Атомиздат.

Хаматдинов, В.Р. (2014). Автономная аппаратура плотностного гамма-гамма каротажа наклонных и горизонтальных скважин. *НТБ "Каротажник"*, 12, 61–76.

Adolph, B., Stoller, C., Archer, M., Codazzi, D., el-Halawani, T. (2005, Autumn). No more waiting: formation evaluating while drilling. *Oilfield review*, 4–21.

Belknap, W.B., Dewan, J.T., Kirkpatrick, C.V., Mott, W.E., Pearson, A.J., Rabson, W.R. (1978). API calibration facility for nuclear logs. Gamma ray, neutron and density logging. SPWLA Reprint, paper E.

Bondarenko, M., Kulyk, V., Yevstakhevych, Z. (2018). Petrophysical parameters of near-surface sandstone rocks based on radioactive loggings. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 46–52.

Ellis, D., Markley, M.E. (2007). Measuring formation density through casing. *US Patent № 7292942 B2*. Schlumberger technology corporation.

Ellis, D.V., Singer, J.M. (2008). Well Logging for Earth Scientists. 2nd ed. Dordrecht: Springer.

Kulyk, V.V., Bondarenko, M.S. (2016). Identification of gas reservoirs and determination of their parameters by combination of radioactive logging methods. *Геофиз. журн.*, 38(2), 106–119.

The Cased Hole Analysis Tool. (2019). Отримано з <https://geologsolutions.ca/chat-tool/>

References

- Adolph, B., Stoller, C., Archer, M., Codazzi, D., el-Halawani, T. (2005, Autumn). No more waiting: formation evaluating while drilling. *Oilfield review*, 4–21.
- Belknap, W.B., Dewan, J.T., Kirkpatrick, C.V., Mott, W.E., Pearson, A.J., Rabson, W.R. (1978). API calibration facility for nuclear logs. Gamma ray, neutron and density logging. SPWLA Reprint, paper E.
- Bondarenko, M., Kulyk, V., Yevstakhevych, Z., Danyliv, S., Zinenko, V., Los, M. (2019). Apparatus and methodical complex for determination of oil-gas reservoirs parameters while drilling horizontal wells. *Вісник of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 87(4), 20–25. [in Ukrainian]
- Bondarenko, M., Kulyk, V., Yevstakhevych, Z. (2018). Petrophysical parameters of near-surface sandstone rocks based on radioactive loggings. *Вісник of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80(1), 46–52.
- Blyumentsev, A.M., Kalistratov, G.A., Lobanov, V.M., Tsurulnikov, V.P. (1991). Metrological provisions of well logging. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Deineko, S.I. (2007). System monitoring of the state of hazardous geological processes on the territory of operating energy facilities (on an example of the Rivne NPP). *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.)*. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv. [in Ukrainian]
- Ellis, D., Markley, M.E. (2007). Measuring formation density through casing. *US Patent № 7292942 B2*. Schlumberger technology corporation.
- Ellis, D.V., Singer, J.M. (2008). Well Logging for Earth Scientists. 2nd ed. Dordrecht: Springer.
- Ferronskiy, V.I., Danilin, A.N., Dubinchuk, V.T., Goncharov, V.S., Seletskiy, Yu.B. (1977). Radioisotope research methods in engineering geology and hydrogeology. 2nd ed. Moscow: Atomizdat. [in Russian]
- Instructions for density logging with SGPL tool and processing the result of measurements. (2004). LLC "Neftegazgeofizika". Tver. Retrieved from http://www.karotazh.ru/sites/default/files/files/instr_sgp.pdf. [in Russian]
- Karpov, T.Yu. (2004). Technology of constructing of models of rocks of oil and gas wells for calibration of neutron logging tools. *Thesis ... Cand. Sci. (Tech.)*. Ural State Mining and Geological Academy. Ekaterinburg. [in Russian]
- Khamatdinov, V.R. (2014). Autonomous density logging tool for inclined and horizontal wells. *Scientific and technical bulletin "Karotazhnik"*, 12, 61–76. [in Russian]
- Kuznetsov, O.L., Poliachenko, A.L. (Eds.). (1990). Well logging nuclear geophysics. Geophysicist's handbook. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Kulyk, V.V., Bondarenko, M.S. (2016). Identification of gas reservoirs and determination of their parameters by combination of radioactive logging methods. *Geophysical journal*, 38(2), 106–119.
- Lobanov, V.M. (2016). Metrological provisions in well logging: Tutorial. Ufa: publishing house of UGNTU. [in Russian]

Lobankov, V.M. (2008). Development of a metrological provisions system for geophysical researches in oil and gas wells. *Extended abstract of Doctor's thesis (Tech.)*. PLC S&P Firm "Geofizika". Ufa. [in Russian]
Prushko, V.R., Kulyk, V.V., Chelokian, R.S., Zvol'skyi, S.T. (2005). Method of producing physical models of rocks. *UA patent for invention № 63112*. Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine. [in Ukrainian]
The Cased Hole Analysis Tool. (2019). Retrieved from <https://geologsolutions.ca/chat-tool/>

Zakirov, R.Z., Kirillov, A.A., Voronkov, L.N. (2009). Metrological provisions of radioactive logging tools in LLC "TNG-Grupp". *Scientific and technical bulletin "Karotazhnik"*, 3(180), 78–84. [in Russian]
Zvol'skyi, S.T. (1980). Gamma-methods for measuring the volume weight of dispersed grounds and sea-floor sediments. Moscow: Atomizdat. [in Russian]
Zvol'skyi, S.T., Kulyk, V.V., Karmazenko, V.V., Ketov, A.Yu., Rybak, V.I., Snizhko, Yu.O. (2008). Method of producing physical models of reservoirs crossed by a well. *UA patent for invention № 84604*. Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.08.20

M. Bondarenko, PhD (Geol.), Senior Researcher;
V. Kulyk, PhD (Phys.-Math.), Leading Researcher,
E-mail: vkulyk@igph.kiev.ua;
O. Dmytrenko, Leading Engineer;
Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
32, Palladin Ave., Kyiv, 03680, Ukraine;
S. Danyliv, Director,
E-mail: danyliv.sm@gmail.com;
LLC "Ukrspetspribor", 5 Zapadynska Str., Kyiv, 04123, Ukraine;
O. Stasiv, Director,
E-mail: office@usg.lg.ua;
LLC "Ukrspetsgeologia",
30 Shevchenko Str., Tereshkyv., Poltava region, 38762, Ukraine;
V. Karmazenko, Director,
E-mail: v.karmazenko@gmail.com;
LLC "Kyiv plant «Geofizprylad»"

PHYSICAL MODELING FOR DENSITY MEASUREMENT OF NEAR-SURFACE ROCKS, BY WIRELINE LOGGING AND LOGGING WHILE DRILLING

The results of the creation of full-scale physical models of rocks for the calibration of combined tools of radioactive logging, which include density logging, are presented. Four sets of models were built for different logging problems.

1. Models of porous carbonate reservoirs with borehole (diameter 216 mm), equipped with interchangeable simulators of casing columns (146 mm i 168 mm) with cement sheath and tubing. The models are aimed to calibrate wireline logging tools for investigating the section of uncased and cased oil&gas wells.

2. Models of rocks of different density with borehole (160 mm), equipped with interchangeable drill collars (120 mm, 108 mm, 89 mm). The models are designed to calibrate density tools for logging while drilling horizontal oil&gas wells.

3. Universal models of porous carbonate reservoirs, crossed by holes of three diameters (200 mm, 160 mm, 125 mm). The purpose of the models is to calibrate wireline logging tools for investigation of section of uncased and cased oil&gas wells and tools for logging while drilling horizontal oil&gas wells.

4. Models of near-surface rocks of different density, equipped with a steel pipe (diameter of 51 mm) closely fitting to rock. The purpose of the models is to calibrate density tools for investigation of near-surface rocks when solving engineering-geological, seismic microzoning, ecological, etc problems.

Physical models were designed and constructed by the employees of the Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine together with partner organizations. The regular use of the models is due to the active work carried out by the Institute of Geophysics, together with partners, to create apparatus-methodical complexes of radioactive logging, which include the density logging.

Graduation relationships and calibration functions for new density logging tools, obtained on the constructed physical models, as well as examples of density determination in different well conditions when solving research-and-production problems, are given.

Keywords: physical models of rocks, oil&gas and near-surface wells, wireline logging, uncased and cased wells, logging while drilling, drill collar, density logging, calibration function, rocks density.

М. Бондаренко, канд. геол. наук, ст. науч. сотр.;
В. Кулик, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр.,
E-mail: vkulyk@igph.kiev.ua;
А. Дмитренко, вед. инж.;
Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
пр. Акад. Палладина, 32, г. Киев, 03680, Украина;
С. Данылив, директор,
E-mail: danyliv.sm@gmail.com;
ООО "Укрспецприбор", ул. Западная, 5, г. Киев, 04123 Украина;
О. Стасив, директор,
E-mail: office@usg.lg.ua;
ООО "Укрспецгеология",
ул. Шевченко, 30, с. Терешки, Полтавская обл., 38762, Украина;
В. Кармазенко, директор,
E-mail: v.karmazenko@gmail.com;
ООО "Киевский завод «Геофизприбор»"

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ КАРОТАЖЕ НА КАБЕЛЕ И В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ

Представлены результаты создания полномасштабных физических моделей горных пород для калибровки комбинированных приборов радиоактивного каротажа (РК), составной частью которого является плотностной гамма-гамма каротаж (ГГК). Построены четыре комплекта моделей для различных задач каротажа.

1. Модели пористых карбонатных пластов-коллекторов, пересеченные скважиной (диаметр 216 мм), укомплектованные сменными имитаторами обсадных колонн (146 мм и 168 мм) с цементным кольцом и насосно-компрессорными трубами. Модели предназначены для калибровки приборов РК на кабеле при исследовании разреза необсаженных и обсаженных нефтегазовых скважин.

2. Модели горных пород разной плотности со скважиной (160 мм), укомплектованные сменными буровыми трубами (120 мм, 108 мм, 89 мм). Модели предназначены для калибровки приборов ГГК для каротажа в процессе бурения горизонтальных нефтегазовых скважин.

3. Универсальные модели пористых карбонатных пластов-коллекторов, пересеченные скважинами трех диаметров (200 мм, 160 мм, 125 мм). Назначение моделей – калибровка приборов РК на кабеле для исследования разреза необсаженных и обсаженных нефтегазовых скважин и приборов РК для каротажа в процессе бурения горизонтальных нефтегазовых скважин.

4. Модели приповерхностных горных пород разной плотности, оснащенные плотно прилегающей к породе стальной трубой диаметром 51 мм. Назначение моделей – калибровка приборов ГГК для исследования приповерхностных горных пород при решении задач инженерно-геологических, сейсмического микрорайонирования, экологических и др.

Физические модели разработаны сотрудниками Института геофизики НАН Украины и реализованы вместе с организациями-партнерами. Постоянное использование моделей обусловлено активными работами, которые ведутся Институтом геофизики вместе с партнерами, по созданию аппаратурно-методических комплексов радиоактивного каротажа, в состав которых входит ГГК.

Для новых приборов ГГК приведены градуировочные зависимости и калибровочные функции, полученные на созданных физических моделях, а также примеры определения плотности в различных скважинных условиях при решении научно-производственных задач.

Ключевые слова: физические модели горных пород, нефтегазовые и приповерхностные скважины, каротаж на кабеле, необсаженные и обсаженные скважины, каротаж в процессе бурения, буровая труба, гамма-гамма каротаж, калибровочная функция, плотность горных пород.

УДК 550.382.3

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.06>

О. Меньшов, д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,

E-mail: menshov.o@ukr.net;Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

РОЛЬ МАГНІТНИХ МЕТОДІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ТЕРИТОРІЙ УЩІЛЬНЕНИХ ПОРІД-КОЛЕКТОРІВ НАФТИ І ГАЗУ: ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

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

Одним із можливих шляхів підвищення видобутку вуглеводневої сировини власного походження в Україні є залучення джерел ущільнених колекторів нафти і газу. Актуальність цього напрямку для країни підтверджується низкою рішень РНБО, розпорядженнями Кабінету Міністрів України та пріоритетними напрямами програми "Горизонт Європа". Магнітні методи дослідження верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтового покриву ореолів розсіювання вуглеводнів є швидкісною, енергозберігаючою та низьковартісною технологією, для якої не має значення генезис покладу: нетрадиційного чи класичного типу. В основі високої інформативності магнітометрії при пошуках нафти та газу лежить припущення про міграцію вуглеводнів (мікропросочування). Даний факт підтверджується сейсмічними, радіоактивними та геохімічними методами. Як приклад вивчення покладів вуглеводнів досліджено територію Балабанівка Богодухівського району Харківської області. На даному етапі для прикладу аналізується лише частина рекогносцирувальних матеріалів. Ґрунти представлені чорноземами глибокими середньогумусними. Досліджено 29 зразків, що відбиралися в межах ареалів впливу свердловин Недільна-1 (продуктивна) та Недільна-2 (непродуктивна). У лабораторних умовах визначено питому магнітну сприйнятливості (χ , МС, MS) за допомогою капамістка KLY (Agico, Чехія) та її частотну залежність χ_{fd} на MS2B (Bartington, UK). Визначено вміст гексану в лабораторії ІГН НАН України. Карти побудовано з використанням методу інтерполяції IDW у середовищі ArcGIS. У західній частині відзначаються околиці збігу підвищених значень МС і понижених значень вмісту гексану. У зоні продуктивної свердловини Недільна-1 зафіксовано підвищені значення МС, а поруч із непродуктивною свердловиною Недільна-2 значення МС є середніми за величиною. Для вмісту гексану біля обох свердловин фіксуються максимуми. Кореляційний аналіз показників МС і вмісту гексану в ґрунтах показав наявність середнього від'ємного зв'язку: $R = -0,4$ ($n = 28$, $p > 0,05$, $r \geq 0,3233$). Вуглеводні та продукти їхнього окиснення мають значну міграційну рухливість, що призводить до формування аутогенних магнітних мінералів від зони покладу до ґрунтового покриву, що виявляється у вигляді аномальних значень магнітної сприйнятливості, залишкової намагніченості та інших магнітних параметрів.

Ключові слова: ущільнені породи, нафта, газ, вуглеводні, ґрунти, магнетизм наколишнього середовища, магнітна сприйнятливості, намагніченість.

Вступ. На сучасному рівні розвитку економіки одним із найгостріших питань залишається доволі незначний видобуток нафти і газу в Україні, що веде до значущих фінансових затрат на імпорт енергоносіїв. Дана ситуація розглядається у контексті національної безпеки і потребує прийняття невідкладних управлінських рішень, в основу яких покладаються дані галузевих організацій та аудитів. Одним із можливих шляхів підвищення видобутку сировини власного походження є маловивчені джерела ущільнених колекторів нафти і газу. Основою управлінських рішень на рівні держави є Загальнодержавна програма (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3268-17#n14>), низка рішень РНБО України (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/n0009525-15#n2>, <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/874/2019#Text>) і діяльність новоствореної Ради експертів з енергетичної безпеки при РНБО України (29.05.20). Зокрема, узгоджено необхідність пошуку відновлювальних джерел енергії та альтернативних видів палива.

Наукові розробки щодо пошуку ефективних алгоритмів розвідки покладів вуглеводнів колекторів нетрадиційного типу вже розпочато, деякі їхні результати в контексті геофізичних вишукувань відображено у звітах, монографіях і статтях (Вижва та ін., 2017; Карпенко та ін., 2017; Михайлов та ін., 2014; Меньшов та Сухорада, 2017). Зазначені дослідження проводилися згідно із Законом України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки", його статті 3 "Пріоритетні напрями розвитку науки і техніки на період до 2020 року". Урахування міжнародного досвіду та побудова стратегії дослідження реалізується і відповідає пріоритетам програми Європейського Союзу (ЄС) "Горизонт 2020", а саме: фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України, сталого розвитку, енергетики та енергоефективності, раціональне природокористування. Крім того, 1 січня 2021 р. розпочинається одна із найбільш потужних наукових та інноваційних грантових програм ЄС

Horizon Europe (Горизонт Європа) як продовження "Горизонт 2020". Структура програми включає Блок 2 "Глобальні виклики та європейська промислова конкурентоспроможність", який містить Кластер "Продовольство, біоекономіка, природні ресурси, сільське господарство та навколишнє середовище". Також у рамках "Горизонт Європа" однією із визначених місій є "Здорові ґрунти та продукти харчування", у якій відзначається, що на якість ґрунтів надзвичайно сильно впливають зміни клімату, ерозії. Приблизно 33 % ґрунтового покриву деградувало, зокрема в ЄС ерозія зачіпає 25 % сільськогосподарських угідь. Нижче буде показано, що видобуток нетрадиційних вуглеводнів тісно пов'язується з деградацією продуктивних ґрунтів.

Також слід зауважити, що розвиток економіки України та її паливно-енергетичного комплексу вимагає практичного впровадження нових енергозберігаючих, високоефективних і низьковартісних технологій. Зокрема, розпорядженням Кабінету Міністрів України № 526-р від 10 липня 2019 р. "Про схвалення Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 року" ставиться завдання створення знань і результатів наукових досліджень, переходу до високотехнологічної інноваційної економіки, упровадження новітніх технологій. Таким критерієм відповідають магнітні дослідження ґрунтів з метою пошуку та розвідки вуглеводнів. В основу застосування магнетизму ґрунтів у нафтогазовій сфері покладається їхня унікальна здатність нести інформацію як про глибинні геологічні процеси, так і про приповерхневу антропогенну діяльність (Gadirov et al., 2018; Menshov et al., 2015). Фізико-хімічною основою застосування методу є факт міграції вуглеводневого флюїду від власне покладу до верхніх шарів геологічного розрізу, включаючи ґрунтовий покрив. На всьому шляху міграції відбувається зміна та формування нових магнітних мінералів (аутогенні магнітні мінерали). За рахунок даного явища ґрунти набувають нових або змінених ма-

гнітних властивостей, які можна ідентифікувати у польових і лабораторних умовах. У процесі комплексної інтерпретації з іншими геофізичними та геохімічними методами отримується нова інформація щодо можливих ареалів залягання нафти і газу. Крім того, інформація про магнітні властивості ґрунтів дозволяє оцінити забруднення і вплив на агрономічні властивості земель (Меньшов, 2016) і палеогеографічні структури (Ivanik et al., 2019), що особливо актуальним є при роботах на територіях залягання колекторів нетрадиційного типу, а отже, і при використанні процесу гідророзриву.

Визначальним є факт унікальності магнітного методу, оскільки для його застосування не має значення власне генезис покладу (родовище нетрадиційного типу чи класичне). Отже, магнітні методи при дослідженні території залягання ущільнених колекторів нафти і газу, ґрунтового покриву та верхньої частини геологічного розрізу можуть використовувати фізико-хімічні основи та існуючі нароби щодо класичних покладів нафти і газу.

Стан проблеми та постановка завдання. Традиційні геофізичні методи, такі як сейсмометрія, направлені на пошук пасток у глибокозалягаючих складних структурах. З метою заощадження значних коштів і часу підтверджено актуальність дослідження процесів мікропросочування та міграції вуглеводневого флюїду у верхні частини геологічного розрізу та ґрунтовий покрив. Розробка чіткого алгоритму застосування даного методу може найближчим часом кардинально змінити саму парадигму розвідки вуглеводнів, більше зосереджуючись на пошуку нафтових родовищ на основі відстеження фізико-хімічних змін приповерхневих природних об'єктів. Довготривала вертикальна міграція флюїду призводить до утворення аутогенних феромагнітних мінералів і модифікації концентрацій радіоактивних елементів у ґрунті: зменшення вмісту калію та збільшення концентрації урану відносно вмісту торію (Senouci and Allek, 2020). Зокрема, для регіону Хассі-Рімел (Алжир) було проведено спектрометрію гамма-випромінювання у повітрі та магнітні аналізи з метою виявлення коливань концентрації радіоактивних елементів і низькоамплітудних магнітних аномалій, що спричинені процесами просочування вуглеводнів. Більшість зон покладів було підтверджено як за магнітними, так і за радіометричними аномаліями. Результати було завірено бурінням свердловин. Ефективним є комплексування магнітних вишукувань з аналізом електронно-парамагнітного резонансу (ЕПР). Наприклад, для продуктивних пластів Вака Муерта (Південна Аргентина) було проведено вимірювання зразків керна з нафтової свердловини (Costanzo-Álvarez et al., 2019). Метою даної роботи було визначення впливу діагенезу, пов'язаного з вуглеводнями, на магнітні властивості горючих сланців. Дані результати особливо актуальні в контексті наших досліджень, присвячених саме нетрадиційним родовищам вуглеводнів. Метод ЕПР застосовувався для вимірювання мінімальних концентрацій вільних радикалів органічних речовин (OMFR), Fe_3^+ та Mn_2^+ . OMFR, отримані в результаті термічної деградації керогену, впливали на первинні оксиди та сульфідні залязла через дві діагенетичні стадії. Перша стадія могла частково розчинити ці мінерали, що веде до зменшення як χ , так і залишкової намагніченості. Другий діагенетичний етап спричинив часткову заміну фрамбоїдного піриту автентичним піротином, що підтверджено за допомогою скануючої електронної мікроскопії (SEM) та аналізом термомагнітних кривих. Результати вивчення гамма-випромінювання, електричного опору та нейтронної пористості виявляють відмінні риси, що свідчить про збільшення вмісту вуглеводнів. Індуковані вуглеводнями

магнітні аномалії в горючих сланцях зумовлені їхніми петрофізичними властивостями.

Серед найбільш сучасних результатів, присвячених дослідженню взаємозв'язку між міграцією вуглеводнів і магнітними властивостями приповерхневих відкладень, відзначимо роботу (Tresnak, 2017). Зразки відбиралися над вуглеводневим силурським рифовим поясом вершини Мічиганського басейну. Досліджували за допомогою декількох магнітних методів та оптичної мікроскопії. Підвищені значення пов'язані з новоутвореним магнетитом у формі сфероїдальних зерен, що утворюються внаслідок вуглеводневого діагенезу, тоді як надзвичайно низька магнітна сприйнятливості може відображати розчинення гематиту. Спостерігалася висока кореляція між підвищеною магнітною сприйнятливостю та резервуарами газу в групі "Девонська траверса". Отримані результати вказують на те, що метод магнітної сприйнятливості має значні перспективи для розвідки вуглеводнів, але відповідні процеси магнітно-мінерального діагенезу вимагають додаткових досліджень. Ще одним прикладом є вивчення магнітної сприйнятливості ґрунту, що зазнав впливу вуглеводнів, для нафтового родовища Воноколо, Східна Ява (Ulfah et al., 2017). Позитивна кореляція між магнітними параметрами та вмістом вуглеводнів може сприяти як оптимізації пошукових робіт, так і розробці неруйнівних та ефективних магнітних методів виявлення розливів нафти в ґрунти, особливо для ремедіації земель колишніх районів розвідки та видобутку вуглеводнів. При цьому варто враховувати й інші інженерно-геологічні фактори, що пов'язані з природоохоронним аспектом розробки родовищ вуглеводнів і супутніх корисних копалин (Dychkovskiy et al., 2020; Falshtynskiy et al., 2018; Petlovanyi et al., 2019).

Результати наших попередніх досліджень указують на високу ефективність магнітного методу при дослідженні покладів вуглеводнів у Передкарпатському прогині та зовнішній частині Карпат (Menshov et al., 2016). Наші результати підтверджуються роботою (Sechman et al., 2020), у якій було оцінено взаємозв'язок між прямими та непрямыми поверхневими геохімічними параметрами в межах зовнішніх Карпат. Дослідження включало аналіз молекулярного складу ґрунту, зразків газу, вмісту кальциту, а також вимірювання магнітної сприйнятливості та pH зразків ґрунту. Результати виявили великі коливання концентрацій різних вуглеводневих і неуглеводневих газів, а також дисперсію значення різних непрямих геохімічних індексів, включаючи магнітну сприйнятливості. Комплексна інтерпретація результатів поверхневих геохімічних досліджень (газ, магнітна сприйнятливості, вміст кальциту, pH) дозволяє досліднику краще зрозуміти складність міграції вуглеводнів через ускладнену будову геологічних структур і надає більш детальну інформацію про положення та характер глибинних покладів. В абсолютних цифрових значеннях результати такі. Найбільша варіація виявлена для концентрації метану (від 1,1 до 2100 ppm). Максимальні концентрації алканів $\text{C}_2\text{--C}_5$, алканів $\text{C}_2\text{--C}_4$ і водню: 10,43 ppm; 0,772 ppm; 0,089 об. % відповідно. Концентрація вуглекислого газу варіювалася від 0,131 до 3,312 об. %. Виміряні значення магнітної сприйнятливості варіювали від 3,6 до $21,5 \times 10^{-8} \text{ м}^3/\text{кг}$. Вміст кальциту в аналізованих ґрунтах змінювався від 0,02 до 29,92 мас. %, а значення pH, які вимірювали в отриманих ґрунтових розчинах зразків ґрунтів, становили від 4,5 до 8,3. Робота (Góra et al., 2019) спрямована на комплексування методу магнітної сприйнятливості та геохімічних досліджень. На прикладі області Бжесько-Войніч Південно-Східної Польщі було досліджено профіль, розташований на межі двох тектонічних

одиниць: центральної частини Передкарпаття та Зовнішньої частини Карпат. Максимальні концентрації CH_4 , алканів $\text{C}_2\text{--C}_5$ та алканів $\text{C}_2\text{--C}_4$ відображалися у максимумах магнітної сприйнятливості, а загальні тенденції відповідали сейсмічним даним.

Для території України за даними (Орлюк та Друкаренко, 2018) встановлено, що аналіз магнітної сприйнятливості та густини порід осадового чохла Чернігівського сегмента ДДА, у комплексі з іншими геолого-геофізичними даними, дає змогу розглядати їх як локальні ознаки нафтогазоносності, що доповнюють регіональні прогнози критерії.

Важливим є комплексування магнітних методів з іншими геофізичними та геопросторовими технологіями. Зокрема, у роботі (De la Rosa et al., 2020) супутникові знімки використовувалися для характеристики зон зміни мінеральної речовини в приповерхневих гірських породах під впливом міграції вуглеводнів. Далі було проведено спільну інтерпретацію результатів спектрального аналізу супутникових зображень, магнітних властивостей гірських порід і геохімічних даних: магнітна сприйнятливості χ , ізотермічна залишкова намагніченість IRM, намагніченість насичення SIRM, спектро-радіометричний та рентген-дифракційний аналіз. Отримана комплексна модель дозволила побудувати кореляційні зв'язки між зазначеними параметрами для зон вивітрювання та діагенетичних змін. Диференціація значень у межах однієї дослідної ділянки для ґрунтів і підстеляючих порід указує на різний тип впливу вуглеводнів на ці об'єкти. Значення SIRM та χ відображають підвищення магнітних властивостей на глибинах 0,3 і 1 м, що імовірно пов'язано з наявністю магнетиту, магеміту та/або сульфідів заліза (піротину та грейгіту) саме в ґрунтовому покриві.

Фізико-хімічні основи методу. В основі високої інформативності магнітометрії при пошуках нафти та газу лежить припущення про міграцію вуглеводнів (мікропросочування) (Liu et al., 2006). Даний факт підтверджується сейсмічними (Onanko et al., 2011), радіоактивними та геохімічними методами. При цьому аномалії магнітної сприйнятливості та інших магнітних параметрів формуються як у залягаючих нижче породах, так і в ґрунтовому покриві за рахунок формування аутогенних (діагенетичних, вторинних) магнітних мінералів.

На даному етапі накопичено матеріал, який підтверджує, що пошуки покладів нафти та газу можуть бути значно інтенсифіковані й здешевлені за рахунок використання магніторозвідки в комбінації з високороздільними магнітними дослідженнями гірських порід і ґрунтів, а також вивченням природи міграції вуглеводнів. При цьому важливою є необхідність зрозуміти механізм новоутворення магнітних мінералів у процесі міграції вуглеводнів. За допомогою геофізичних і геохімічних методів на поверхні фіксуються аномалії відповідних полів і властивостей гірських порід і ґрунтів. Основними складовими цієї моделі є такі фактори:

1. Мікропросочування призводить до формування мікробіологічних аномалій (основа процесу взаємодії вуглеводнів з магнітними мінералами в ґрунтах і породах), фіксуються витоки на поверхню грязьових, сольових і вуглеводневих мікстур.
2. Аутогенні мінералогічні зміни за участю піриту, калциту, сірки, інших сульфідів та оксидів заліза.
3. Зміни глинистих мінералів.
4. Електрохімічні процеси та формування електрохімічних аномалій.
5. Формування радіоактивних аномалій.
6. Формування біогеохімічних і геоботанічних аномалій.

Слід відмітити, що основна роль у взаємодії вуглеводнів із вмісним середовищем належить бактеріям і мікробам, окисно-відновним процесам, у яких вони беруть участь. За умови довгострокового протікання зазначених процесів міграції вуглеводнів відбувається формування аномальних зон окиснення у приповерхневих геологічних шарах і ґрунтовому покриві територій покладів вуглеводнів. При цьому інформативними є методи дослідження вмісту вуглецю у ґрунтах, електричні методи, радіоактивні, дистанційне зондування, магніторозвідка та дослідження магнетизму гірських порід і ґрунтів. У геологічному розрізі в межах родовищ вуглеводнів звичайно виділяють чотири зони (Никитский и Глебовской, 1990):

1. Поклад і колектор.
2. Зона відновлення.
3. Зона окиснення.
4. Зона субвертикальних неоднорідностей.

Модель магнітних змін у геологічному розрізі над покладами нафти і газу наводиться на рис. 1. Основні характеристики даних зон наведено в табл. 1. Зауважимо, що ґрунтовий покрив належить до верхньої зони окиснення. Поряд із процесами, що характерні для зони окиснення підстеляючих гірських порід, у ґрунтах накладаються процеси, пов'язані із ґрунтоутворенням, наявністю гумусу, магнетотактичних ґрунтовірних бактерій і т. ін.

Магнітні властивості ґрунтів часто є вищими від підстеляючих формацій. Тому слід розроблювати магнітний сигнал від ґрунтів, що пов'язані з безпосереднім впливом флюїду, та магнітний сигнал, що сформований природним (педогенним) магнетизмом ґрунтів.

Щоб більш глибоко зрозуміти фізико-хімічні процеси, які ведуть до зміни магнітної мінералогії гірських порід і ґрунтів у зоні впливу вуглеводнів, розглянемо їхні основні типи. Більш детально моделі на атомарно-молекулярному рівні описано в (Menshov et al., 2015; Menshov et al., 2020; Меньшов та ін., 2016). Існує декілька моделей таких процесів. Перша з моделей запропонована (Donovan et al., 1979). Вона включає утворення вторинного діагенетичного магнетиту в процесі міграції вуглеводнів і базується на заміщенні Fe^{3+} з гематиту на Fe^{2+} з магнетиту. Друга модель (Goldhaber and Reynolds, 1991) ґрунтується на теорії, що аналізує магнітні мінерали сульфідів. Вона припускає, що заміщення піриту відіграє вирішальну роль у формуванні аутогенного новоутвореного магнітного мінералу піротину, який генерує аномалії магнітного поля та змінює магнетизм ґрунтів у присутності покладів вуглеводнів. У наведених вище процесах основну роль відіграють мікробіологічні та термохімічні процеси (Machel, 2001). Ще одна модель (Elmore and Grawford, 1990), яка пояснює формування підвищеного ступеня магнетизму нафтогазовмісних осадових порід і ґрунтів, базується на залученні до даних процесів сидериту.

У межах ареалів розсіювання вуглеводнів над їхніми покладами молекули мігрують у вертикальному напрямку до поверхні, що викликає зміни в магнітній мінералогії гірських порід верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтовому покриві. Якісна інтерпретація процесів молекулярної міграції нафти і газу може бути проведена на основі термодинамічної теорії дифузії газів і рідин. Згідно з (Shao et al., 2005) теорія дифузії описує міграцію молекул вуглеводнів як замкнуту систему. Кількісна різниця фізичних величин спонукає речовини та їхню енергію перерозподілятися до моменту досягнення динамічної рівноваги системи. Резервуари нафти і газу беруться при цьому за джерело вуглеводневої речо-

вини, звідси різниця концентрацій вуглеводнів є надзвичайно високою порівняно із вмісним навколишнім середовищем. Отже, дифузія вуглеводневої речовини

матиме місце, якщо навколишнє середовище є замкнутою системою. Дана теорія підтверджена на прикладі Західного Китаю, а інформація узгоджується з бурінням серії свердловин.

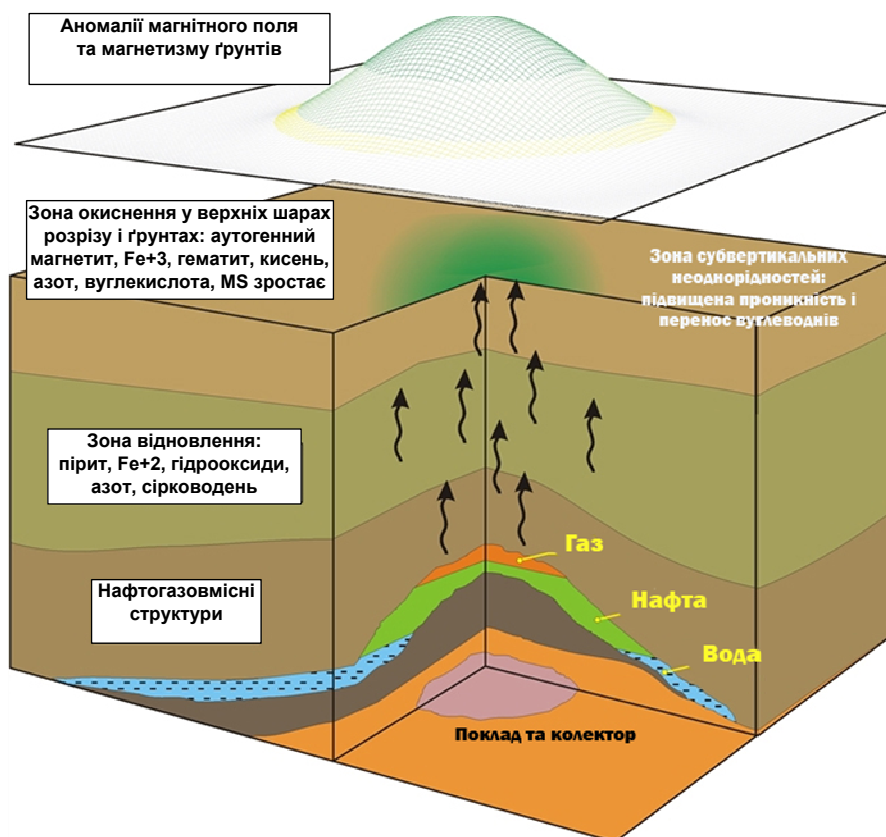


Рис. 1. Узагальнена магнітна модель змін магнітних характеристик геологічного розрізу над покладами вуглеводнів

Таблиця 1

Магнітні мінерали в геологічних горизонтах і ґрунтовому покриві територій покладів вуглеводнів

Частина розрізу	Мінерал	Тип магнетика	Об'ємна магнітна сприйнятливості матеріалу ϵ
Колектор з покладом	магнетит Fe^{+2} магеміт сидерит хлорити пірит	ферімагнетик ферімагнетик парамагнетик парамагнетик парамагнетик	мінерали: $\epsilon \leq 30 \times 10^{-6}$ од. CI магнітні мінерали: $\epsilon = 6 \times 10^{-2}$ од. CI газ: $\epsilon \leq 10 \times 10^{-6}$ од. CI
Зона відновлення	магеміт гематит ільменіт гетит	ферімагнетик антиферомагнетик антиферомагнетик антиферомагнетик	магнітна сприйнятливості понижується на $\epsilon = 400-600 \times 10^{-6}$ од. CI
Зона окиснення	магнетит Fe^{+3} магеміт гематит ільменіт гетит сидерит піротин	ферімагнетик ферімагнетик антиферомагнетик антиферомагнетик антиферомагнетик парамагнетик ферімагнетик	підвищені значення магнітної сприйнятливості, формування аутогенних магнетиків
Зона субвертикальних неоднорідностей	підвищується неоднорідність магнетизму порід у всьому розрізі	підвищена лужність, понижений окисно-відновний потенціал	висока неоднорідність магнетизму порід, високодисперсні різнозначові магнітні аномалії
Ґрунтовий покрив	магнетит Fe^{+3} магнетит Fe^{+2} магеміт піротин гематит	ферімагнетик ферімагнетик ферімагнетик ферімагнетик антиферомагнетик	звичайні ґрунти $\epsilon = 100-1000 \times 10^{-6}$ од. CI, насичені вуглеводнями ґрунти $\epsilon = 100-4500 \times 10^{-6}$ од. CI

Міграція вуглеводнів залежить від таких факторів, як температура, тиск, pH, Eh, активність двовалентного заліза, характеристики залізистих мінералів, гідродинамічних умов, активності мікроорганізмів, сірки та бікарбонатів. Водночас слід ретельно ставитися до процесу обробки та інтерпретації одержаних результатів, проводити чітку розбравку магнітного сигналу в ґрунтах. Це пов'язано з наявністю магнітних мінералів у структурі ґрунтів ґрунтоутворного (педогенного) походження, які сформувалися у процесі ґрунтоутворення поза впливом вуглеводневої речовини. Наприклад, чорноземи України, які розповсюджені вище лесових товщ, містять дрібнозернистий окисний магнетит та магеміт ґрунтового походження, які сформувалися у процесі вивітрювання материнської породи без будь-якого впливу вуглеводневої речовини (*Jeleńska et al., 2004*). Дана ситуація є характерною для покладів вуглеводнів у межах ДДЗ України (*Меньшов, 2018*).

Високомагнітні мінеральні фази в деяких випадках у ґрунтах можуть повертатися до стану вихідних, менш магнітних піриту, сидериту, гематиту, в умовах відновного середовища (*Ellwood and Burkart, 1996*). Відповідні флуктуації ведуть до формування високодисперсних пілоподібних аномалій магнітного поля над родовищами вуглеводнів, особливо в зонах субвертикальних неоднорідностей. З одного боку, це ускладнює процес інтерпретації, а з іншого – стає ще одним критерієм виявлення наявності покладів за магнітними показниками.

У методологічному контексті для магнітного методу не має значення генезис нафти і газу, адже магнетизм природних об'єктів може виступати як прямопошуковий метод. Отже, методологія та технологія досліджень при вивченні територій ущільнених порід-колекторів нафти і газу є аналогічною до традиційних покладів вуглеводнів. Основним завданням при цьому постає не розвідка відповідних структур, пасток тощо, а вимірювання зміни магнітних характеристик, що відбуваються в гірській породі або ґрунтовому покриві під впливом флюїдів вуглеводневого походження. Якщо такий слід від газу чи нафти ущільнених порід існує, тоді стає можливим використання магнітометрії. Водночас слід урахувати і дослідження низькоамплітудних магнітних аномалій, які можуть генеруватися, наприклад, ґрунтовим покривом. Дана інформація необхідна для розбравки магнітного сигналу ґрунтів і сигналу, спричиненого іншими геологічними об'єктами. Крім того, при аналізі ущільнених порід-колекторів нафти і газу важливим є моніторинг забруднення родючих ґрунтів і деградація аграрних земель. Постає необхідність магнітного картування ґрунтів, що зазнали впливу гідророзриву, а також витоків вуглеводнів на поверхню.

Приклади рекогносцирувальних досліджень. Як приклад для ілюстрації результатів наших досліджень звернемося до вивчення ділянки покладів вуглеводнів біля селища Балабанівка Богодухівського району Харківської області. Досліджувалась колекція зразків ґрунту, що представлена чорноземами глибокими середньомусними. Було проаналізовано 29 зразків, що відбиралися у межах ареалів впливу свердловин Недільна-1 (продуктивна) і Недільна-2 (непродуктивна). У лабораторних умовах визначено питому магнітну сприйнятливості та її частотну залежність за допомогою капамістка KLY (Agico, Чехія) і двочастотного вимірювача магнітної сприйнятливості MS2B (Bartington, UK). Вимірювання проводили у межах підготовки курсової роботи студент Б. Круглов, а частина результатів наводилися в публікації (*Круглов та Меньшов, 2020*). Паралельно відбувалися дослідження атмогеохімічним методом фахівцями

Інституту геологічних наук НАН "України" (д-р геол. наук Багрій І. та С. Зубаль). Зокрема, визначено вміст гексану в лабораторії ІГН. Карту розподілу магнітної сприйнятливості ґрунтів з використанням методу інтерполяції IDW у середовищі ArcGIS наведено на рис. 2. На рис. 3 наводиться карта розподілу гексану для тих самих точок дослідження з використанням методу інтерполяції IDW у середовищі ArcGIS.

Як видно з рис. 2 і 3, закономірності просторового розподілу значень магнітної сприйнятливості та вмісту гексану мають низку спільних рис. Зокрема, у західній частині відзначаються околиці збігу підвищених значень магнітної сприйнятливості та понижених значень вмісту гексану. Поруч із продуктивною свердловиною Недільна-1 зафіксовано підвищені значення МС, а в околі непродуктивної Недільна-2 значення МС є середніми за величиною. Для вмісту гексану біля обох свердловин фіксуються максимуми.

Кореляційний аналіз показників МС і вмісту гексану в ґрунтах показав наявність середнього від'ємного зв'язку: $R = -0,4$ ($n = 28$, $p > 0,05$, $r \geq 0,3233$). Такі дані є значущими за зазначеної достовірності та вибірки (*Fisher and Frank, 1961*).

Загальна картина розсіювання гексану в зразках ґрунтів, як і розподіли магнітної сприйнятливості, є доволі складними для інтерпретації. Пояснюється це фізико-хімічними особливостями міграції вуглеводневого флюїду у верхні горизонти геологічного розрізу та ґрунтовий покрив. При цьому слід враховувати хало (haloe) ефект, природний магнетизм ґрунтів, ландшафтні особливості та геологічну будову території. Феромагнітні мінерали гірських порід і ґрунтів за межами зони покладу меншою мірою піддаються хімічному впливу і зберігаються в первісному вигляді. Такі епігенетичні перетворення призводять до перерозподілу намагніченості природних об'єктів у склепінні структури і на її флангах, що створює сприятливі передумови для відображення в магнітному полі (*Безукладнов и Мавричев, 1997*). У даному прикладі аналізується зв'язок магнітної сприйнятливості з гексаном C6H14. Відомо (*Багрій та ін., 2013; Коржов та ін., 2011*), що вуглеводні C5-C8 і важчі типові тільки для нафти, але їхні міграційні можливості обмежені у зв'язку з великою молекулярною вагою. Раніше вважалося, що вони можуть зустрічатися тільки в районі з інтенсивною вертикальною міграцією зонами тектонічних порушень (*Неручаев та ін., 1998*). Проте за більш новими даними (*Исаев та ін., 2009*) при геохімічних дослідженнях Західно-Сибірської плити успішну розвідку покладів вуглеводнів без буріння було проведено на основі аналізу аномалій важких C10-C14 ароматичних вуглеводнів, а не як раніше за аномаліями вуглеводневих та інших газів або за складом важких алканових вуглеводнів. Результати виявили кільцеві зони аномалій концентрацій важких вуглеводнів, які збігаються в латеральному напрямку з положенням водно-нафтового контакту нафтових покладів. Таким чином, важкі вуглеводні утворюють стійкі аномальні зони концентрацій в приповерхневих відкладах і ґрунтовому покриві, які пов'язані з продуктивними пластами нафти і газу і, як підтверджує наведений нами приклад, можуть фіксуватися магнітними методами. Вуглеводні та продукти їхнього окиснення мають значну міграційну рухливість, що призводить до формування аутогенних магнітних мінералів від зони власне покладу до ґрунтового покриву, що виявляється у вигляді аномальних значень магнітної сприйнятливості, залишкової намагніченості та інших магнітних параметрів.

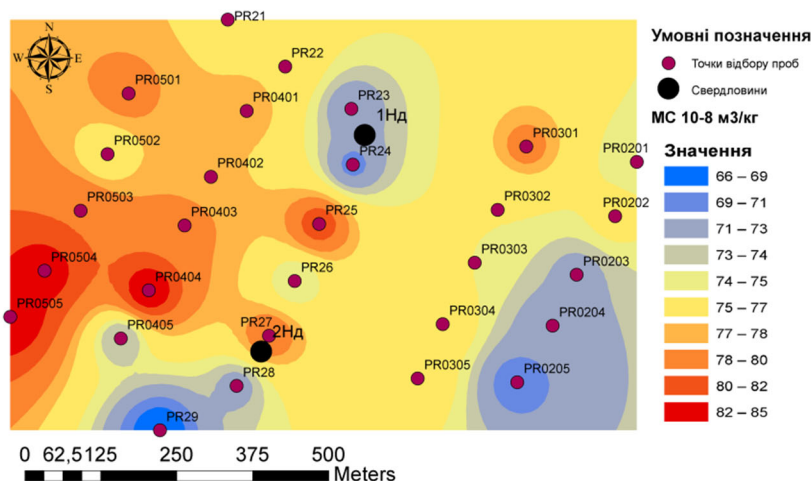


Рис. 2. Карта розподілу магнітної сприйнятливості ґрунтів

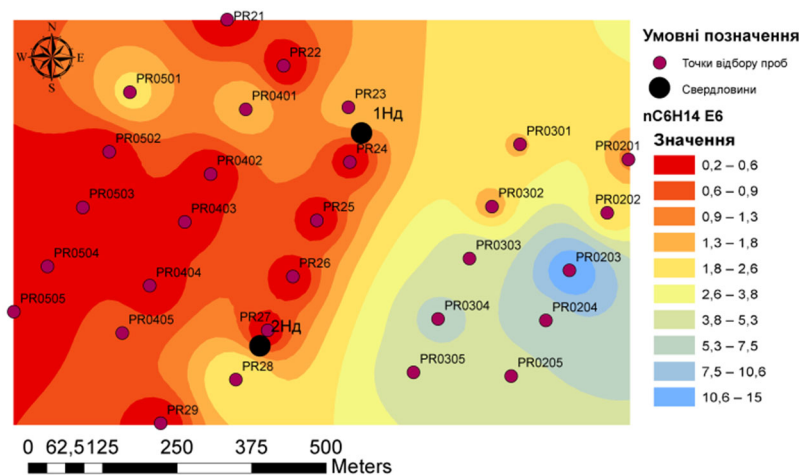


Рис. 3. Карта розподілу вмісту гексану в ґрунтах

Висновки. Актуальність для України дослідження ущільнених колекторів нафти і газу підтверджується низкою рішень РНБО, розпорядженнями Кабінету Міністрів України та пріоритетними напрямками програми "Горизонт Європа". При цьому запропоновані магнітні методи дослідження верхньої частини геологічного розрізу та ґрунтового покриву ареалів розсіювання вуглеводнів є швидкісною, енергозберігаючою та низьковартісною технологією, для якої не має значення генезис покладу (нетрадиційного чи класичного типу). Аналіз найсучасніших закордонних публікацій (головним чином за 2017–2021 рр.) підтверджує необхідність включення магнітного методу до комплексу петрофізичних і геохімічних досліджень нетрадиційних колекторів нафти і газу. Фізико-хімічною основою магнітного методу є процес міграції вуглеводневого флюїду до денної поверхні та формування аутогенних магнітних мінералів. Для ґрунтового покриву можуть спостерігатися процеси як окиснення, так і відновлення, що проявляється у чергуванні максимумів і мінімумів значень магнітної сприйнятливості. На прикладі дослідної ділянки Балабанівка Богодухівського району Харківської області для продуктивної свердловини Недільна-1 зафіксовано підвищені значення магнітної сприйнятливості, а в околі непродуктивної Недільна-2 значення МС є середніми за величиною. Для значень вмісту гексану поруч з обома свердловинами фіксуються максимуми. Кореляційний аналіз показників МС і вмісту гексану в ґрунтах показав наявність середнього від'ємного зв'язку: $R = -0,4$.

Підтвердження. Робота виконана в межах держбюджетної теми "Петрофізичні і геохімічні критерії виділення та оцінки продуктивності ущільнених порід-колекторів нафти і газу".

Список використаних джерел

- Багрий, І.Д., Грига, М.Ю., Войцицький, З.Я., Аксьом, С.Д., Мамишев, І.Є. (2013). Прогнозування покладів вуглеводнів на структурі Глибока за результатами структурно-термо-атмогеохімічних (стаг) досліджень. *Геологія і полезные ископаемые мирового океана*, 4(34).
- Безукладнов, В.А., Мавричев, В.Г. (1997). Выявление аномалий типа "залежь" по магнитному полю. *Геология нефти и газа*, (6), 25–29.
- Вижва С., Михайлов В., Онищук І. (2017). Петрофізичні особливості порід Майкопської серії Кримсько-Чорноморського регіону. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(79), 12–20.
- Исаев, В.И., Коржов, Ю.В., Лобова, Г.А., Ярков, Д.М. (2009). Геохимическая оценка нефтегазоносности локальных ловушек. *Геоинформатика*, (2), 54–61.
- Карпенко О. та ін. (2017). Наукові засади передумов нафтогазоносності спланцевих товщ і складнопобудованих порід-колекторів. *Звіт з НДР*. Київ.
- Коржов, Ю.В., Исаев, В.И., Жильцова, А.А. (2011). Проблемы нефтепоисковой геохимии и обобщающая схема миграции углеводородных флюидов. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 318(1), 116–122.
- Круглов, Б.О., Меньшов, О.І. (2020). Застосування магнітних характеристик ґрунтів при пошуку вуглеводнів на прикладі ділянки "Недільна". *X Всеукраїнська молодіжна наукова конференція-школа "Сучасні проблеми наук про Землю"*, 101–104.
- Меньшов, О., Кудеравец, Р., Попов, С., Хоменко, Р., Сухорада, А., Чоботок, І. (2016). Термоманітний аналіз ґрунтів територій покладів вуглеводнів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(73), 33–37.
- Меньшов, О.І. (2016). Застосування магнітних методів для контролю змін продуктивних земель. *Геофізичний журнал*, 38(4), 130–137.

- Меньшов, О., Сухорада А. (2017). Основи теорії та методології геофізики ґрунтового покриву: перші результати практичного застосування. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(79), 35–39.
- Меньшов, О. (2018). Роль магнетотактичних бактерій у формуванні природного магнетизму ґрунтів України. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80(1), 40–45.
- Михайлов, В.А., Вакарчук, С.Г., Зейкан, О.Ю., Касянчук, С.В., Куровець, І.М., Вишва, С.А., ... Кульчицька, Г.О. (2014). *Нетрадиційні джерела вуглеводнів України*. Монографія.
- Неручев, С.Г., Рогозіна, Е.А., Шиманський, В.К., Соболев, В.С., Парпорова, Г.М. (1998). *Справочник по геохимии нефти и газа*. СПб.: ОАО Недр.
- Никитський, В.Е., Глебовской, Ю.С. (Ред.). (1990). *Магниторазведка: справочник геофизика*. Москва: Недр.
- Орлюк, М.І., Друкаренко, В.В. (2018). Прогноз шляхів проходження і місць накопичення вуглеводнів Чернігівського сегмента Дніпровсько-Донецького авлакогену за геомагнітними даними. *Геофізичний журнал*, 2(40), 123–140.
- Costanzo-Alvarez, V., Rapalini, A.E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M.P., ... Walther, A.M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.
- De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yezpez, S., Amon, C. (2020). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 103036.
- Donavan, T.J., Forgey, R.L., Roberts, A.A. (1979). Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *AAPG Bull.*, 63, 245–248.
- Dychkovskiy, R., Shavarskiy, I., Saik, P., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Cabana, E. (2020). Research into stress-strain state of the rock mass condition in the process of the operation of double-unit longwalls. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 85–94. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.085>
- Elmore, R.D., Grawford, L. (1990). Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis. *Journal Geophys. Res.*, 95(B), 4539–4549.
- Ellwood, B.B., Burkart, B. (1996). A test of hydrocarbon-induced magnetic patterns in soils: the sanitary landfill as laboratory. In D. Schumacher and M.A. Abrams (Eds.), *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. AAPG Memoir, 66, 91–98.
- Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Dychkovskiy, 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>
- Fisher, R.A., Frank, Y. (1961). *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*. 6th ed. London: Longman Group, Ltd.
- 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.
- Goldhaber, M.B., Reynolds, R.L. (1991). Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain. *Geophysics*, 56, 748–757.
- Góra, A., Wojas, A., Sechman, H., Guzy, P., & Twaróg, A. (2019). Distribution of light hydrocarbons in the near surface zone connected with measurements of magnetic susceptibility in the marginal part of the Carpathian Foredeep and Outer Carpathians – case study from SE Poland. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 19(1.2), 795–802.
- 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.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K., Kądziałko-Hofmoki M., Matviishina Z. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophys. J. Int.*, 159, 104–116.
- Liu, Q., Liu, Q., Chan, L., Yang, T., Xia, X., Cheng, T. (2006). Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field., Jiangnan Basin China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 53, 25–33.
- Machel, H.G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.*, 14, 143–175.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59(4), 614–627.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(4), 731–746.
- 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(8), 1–10.
- Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.
- Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskiy, 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>
- Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., Maslanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.
- Senouci, M., Alek, K. (2020). Application of Bayesian classifier to magnetic and gamma ray spectrometry data for targeting hydrocarbon microseepages. *Journal of Applied Geophysics*, 181, 104–145.
- Shao, G., Liang, Z., Wang, Z., Liu, G., Wang, W. (2005). Surface Loess Susceptibility Anomalies Directly Indicating Oil and Gas Reservoirs. *Applied Geophysics*, 1-2(4), 197–203.
- Tresnak, J. (2017). *Rock Magnetic Investigation of the Michigan Basin Soils and Sediments Overlying the Oil-Bearing Silurian Pinnacle Reefs*. Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University.
- Ulfah, M., Wijatmoko, B., Fitriani, D. (2017). Magnetic Susceptibility Analysis of Soil Affected by Hydrocarbon in Wonocolo Traditional Oil Field, Indonesia. *E&ES*, 62(1), 012002.
- ### References
- Bagriy, I.D., Griga, M.Yu., Voytsytsky, Z.Ya., Aksyom, S.D., Mamyshev, I.E. (2013). Forecasting of hydrocarbon deposits on the Hlyboka structure based on the results of structural-thermo-atmogeochimical (stag) research. *Geology and Minerals of the World Ocean*, 4 (34). [in Ukrainian]
- Bezukladnov, V.A., Mavrichev, V.G. (1997). Identification of anomalies such a "deposit" by use magnetic field analysis. *Geol Oil Gas*, (6), 25–29 [in Russian]
- Costanzo-Alvarez, V., Rapalini, A. E., Aldana, M., Díaz, M., Kietzmann, D., Iglesia-Llanos, M.P., ... Walther, A.M. (2019). A combined rock-magnetic and EPR study about the effects of hydrocarbon-related diagenesis on the magnetic signature of oil shales (Vaca Muerta formation, southwestern Argentina). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 173, 861–879.
- De la Rosa, R., Aldana, M., Costanzo-Alvarez, V., Yezpez, S., Amon, C. (2020). The surface expression of hydrocarbon seeps characterized by satellite image spectral analysis and rock magnetic data (Falcon basin, western Venezuela). *Journal of South American Earth Sciences*, 103036.
- Donavan, T.J., Forgey, R.L., Roberts, A.A. (1979). Aeromagnetic detection of diagenetic magnetite over oil fields. *AAPG Bull.*, 63, 245–248.
- Dychkovskiy, R., Shavarskiy, I., Saik, P., Lozynskiy, V., Falshtynskiy, V., Cabana, E. (2020). Research into stress-strain state of the rock mass condition in the process of the operation of double-unit longwalls. *Mining of Mineral Deposits*, 14(2), 85–94. <https://doi.org/10.33271/mining14.02.085>
- Elmore, R.D., Grawford, L. (1990). Remanence in authigenic magnetite: testing the hydrocarbon-magnetite hypothesis. *Journal Geophys. Res.*, 95(B), 4539–4549.
- Ellwood, B.B., Burkart, B. (1996). A test of hydrocarbon-induced magnetic patterns in soils: the sanitary landfill as laboratory. In D. Schumacher and M.A. Abrams (Eds.), *Hydrocarbon migration and its near-surface expression*. AAPG Memoir, 66, 91–98.
- Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Dychkovskiy, 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>
- Fisher, R.A., Frank, Y. (1961). *Statistical Tables for Biological, Agricultural and Medical Research*. 6th ed. London: Longman Group, Ltd.
- 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.
- Goldhaber, M.B., Reynolds, R.L. (1991). Relations among hydrocarbon reservoirs, epigenetic sulfidization, and rock magnetization: examples from the South Texas Coastal Plain. *Geophysics*, 56, 748–757.
- Góra, A., Wojas, A., Sechman, H., Guzy, P., Twaróg, A. (2019). Distribution of light hydrocarbons in the near surface zone connected with measurements of magnetic susceptibility in the marginal part of the Carpathian Foredeep and Outer Carpathians – case study from SE Poland. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 19(1.2), 795–802.
- 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.
- Jeleńska, M., Hasso-Agopsowicz, A., Kopcewicz, B., Sukhorada, A., Tyamina, K., Kądziałko-Hofmoki M., Matviishina Z. (2004). Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophys. J. Int.*, 159, 104–116.
- Liu, Q., Liu, Q., Chan, L., Yang, T., Xia, X., Cheng, T. (2006). Magnetic enhancement caused by hydrocarbon migration in the Mawangmiao Oil Field., Jiangnan Basin China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 53, 25–33.
- Machel, H.G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.*, 14, 143–175.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59(4), 614–627.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(4), 731–746.
- 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(8), 1–10.
- Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.
- Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskiy, 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>
- Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., Maslanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.
- Senouci, M., Alek, K. (2020). Application of Bayesian classifier to magnetic and gamma ray spectrometry data for targeting hydrocarbon microseepages. *Journal of Applied Geophysics*, 181, 104–145.
- Shao, G., Liang, Z., Wang, Z., Liu, G., Wang, W. (2005). Surface Loess Susceptibility Anomalies Directly Indicating Oil and Gas Reservoirs. *Applied Geophysics*, 1-2(4), 197–203.
- Tresnak, J. (2017). *Rock Magnetic Investigation of the Michigan Basin Soils and Sediments Overlying the Oil-Bearing Silurian Pinnacle Reefs*. Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University.
- Ulfah, M., Wijatmoko, B., Fitriani, D. (2017). Magnetic Susceptibility Analysis of Soil Affected by Hydrocarbon in Wonocolo Traditional Oil Field, Indonesia. *E&ES*, 62(1), 012002.

- Machel, H.G. (2001). Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings – old and new insights. *Sediment. Geol.* 14, 143–175.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2015). Magnetic mapping and soil magnetometry of hydrocarbon prospective areas in western Ukraine. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 59(4), 614–627.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(4), 731–746.
- Menshov O., Kuderavets R., Popov S., Homenko R., Sukhorada A., Chobotok I. (2016). Thermomagnetic analyzes of soils from the hydrocarbon fields. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(73), 33–37. [in Ukrainian]
- Menshov, O.I. (2016). Magnetic method applying for the control of productive land degradation. *Geofizicheskii Zhurnal*, 38(4), 130–137. [in Ukrainian]
- Menshov, O., Sukhorada, A. (2017). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(79), 35–39. [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*, 80(1), 40–45. [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(8), 1–10.
- Mykhailov, V.A., Vakarchuk, S.G., Zeykan, O. Yu., Kasyanchuk, S.V., Kurovets, I.M., Vyzhva, S.A., ... Kulchitska, G.O. (2014). Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine. [in Ukrainian]
- Neruchev, S.G., Rogozina, E.A., Shimansky, V.K., Sobolev, V.S., Parparova, G.M. (1998). Handbook of the geochemistry of oil and gas. SPb.: JSC Nedra. [in Russian]
- Nikit'sky, V.E., Glebovskoy, Yu.S. (Ed.). (1990). Magnetic survey: handbook of geophysics. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Onanko, Y.A., Prodayvoda, G.T., Vyzhva, S.A., Onanho, A.P., Kulish, M.P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalfizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.
- Orlyuk, M.I., Drukarenko, V.V. (2018). Prediction of pathways and places of accumulation for hydrocarbons of the Cherniv segment of the Dnieper Donets aulacogene in relation to magnetic heterogeneity. *Geophysical Journal*, 2(40), 123–140. [in Ukrainian]
- 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>
- Sechman, H., Guzy, P., Kaszuba, P., Wojas, A., Machowski, G., Twaróg, A., Maslanka, A. (2020). Direct and indirect surface geochemical methods in petroleum exploration: a case study from eastern part of the Polish Outer Carpathians. *International Journal of Earth Sciences*, 109, 1853–1867.
- Senouci, M., Allek, K. (2020). Application of Bayesian classifier to magnetic and gamma ray spectrometry data for targeting hydrocarbon microseepage. *Journal of Applied Geophysics*, 181, 104145.
- Shao, G., Liang, Z., Wang, Z., Liu, G., Wang, W. (2005). Surface Loess Susceptibility Anomalies Directly Indicating Oil and Gas Reservoirs. *Applied Geophysics*, 1-2(4), 197–203.
- Tresnak, J. (2017). Rock Magnetic Investigation of the Michigan Basin Soils and Sediments Overlaying the Oil-Bearing Silurian Pinnacle Reefs. Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University.
- Ulfah, M., Wijatmoko, B., Fitriani, D. (2017). Magnetic Susceptibility Analysis of Soil Affected by Hydrocarbon in Wonocolo Traditional Oil Field, Indonesia. *E&ES*, 62(1), 012002.
- Vyzhva, S., Mykhailov, V., Onischuk, I. (2017). Petrophysical features of Maikop series of the Crimean-Black sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(79), 12–20. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 11.11.2020

O. Menshov, Dr Sci (Geol.), Senior Researcher,
E-mail: menshov.o@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

THE ROLE OF MAGNETIC METHODS IN THE STUDY OF AREAS OF THE TIGHT OIL AND GAS: INTRODUCTION

One of the possible ways to increase the production of hydrocarbon raw materials of Ukraine origin is the attraction of the sources of tight oil and gas reservoirs. The relevance of this direction for Ukraine is confirmed by a number of decisions of the NSDC, Cabinet of Ministers of Ukraine, and priority areas of the Horizon Europe program. Magnetic methods for studying the near surface geological section and soil of hydrocarbon fields is a fast, energy-saving and cheap technology. The technique is the same for the unconventional or classical type, thus the genesis of the deposit is not important. The high information content of magnetometry in oil and gas exploration is based on the assumption of hydrocarbon migration (microseepage). This fact is confirmed by seismic, radioactive, and geochemical methods. The case study from hydrocarbon deposit at the area of Balabanovka, Bogodukhovsky district, Kharkov region, is considered. At this stage, we analyze only a part of the reconnaissance materials. The soil is deep medium-humus chernozems. We collected 29 samples at the areas of hydrocarbon influence: well Nedilna-1 (productive) and Nedilna-2 (non-productive). In laboratory conditions, the mass-specific magnetic susceptibility (χ , MS) was measured with kappabridge KLY (Agico, Czech Republic), and its frequency dependence χ_{fd} by the MS2B (Bartington, UK). The content of hexane in soil was determined at the laboratory of the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine. The maps were built using the IDW interpolation method in the ArcGIS environment. There are areas of overlap of increased MS values and decreased values of the hexane content in the western part. The increased MS values were registered in the zone of the productive well Nedilna-1. The average MS values were detected near the non-productive well Nedilna-2. The maximum values of the hexane content were registered near both wells. The correlation analysis of MS and the content of hexane in soils showed the presence of an average negative relationship: $R = -0.4$ ($n=28$, $p<0.05$, $r\geq 0.3233$). Hydrocarbons and their oxidation products have significant migratory mobility, which leads to the formation of autogenous magnetic minerals from the deposit zone to the soil. The result is the formation of anomalous values of magnetic susceptibility, remanent magnetization, and other magnetic parameters.

Keywords: tight oil and gas, hydrocarbons, soils, environmental magnetism, magnetic susceptibility, magnetization

A. Меньшов, д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: menshov.o@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

РОЛЬ МАГНИТНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ТЕРРИТОРИЙ УПЛОТНЕННЫХ ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ НЕФТИ И ГАЗА: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из возможных путей повышения добычи углеводородного сырья собственного происхождения в Украине является использование источников уплотненных коллекторов нефти и газа. Актуальность этого направления для страны подтверждается рядом решений СНБО, распоряжениями Кабинета Министров Украины и приоритетными направлениями программы Горизонт Европа. Магнитные методы исследования верхней части геологического разреза и почвенного покрова ореолов рассеяния углеводородов являются быстрой, энергосберегающей и дешевой технологией, для которой не имеет значения генезис залежи: нетрадиционного или классического типа. В основе высокой информативности магнитометрии при поисках нефти и газа лежит предположение о миграции углеводородов (микропросачивание). Данный факт подтверждается сейсмическими, радиоактивными и геохимическими методами. В качестве примера изучения залежей углеводородов рассмотрена территория Балабановка Богодуховского района Харьковской области. На данном этапе в примере анализируются только часть рекогносцировочных материалов. Почвы представлены черноземами глубокими среднегумусными. Исследовано 29 образцов, которые отбирались в пределах ареалов влияния скважины Недильная-1 (продуктивная) и Недильная-2 (непродуктивная). В лабораторных условиях измерены удельная магнитная восприимчивость (χ , МС, MS) с помощью капламоста KLY (Agico, Чехия) и ее частотная зависимость χ_{fd} на MS2B (Bartington, UK). Определено содержание гексана в лаборатории ИГН НАН Украины. Карты построены с использованием метода интерполяции IDW в среде ArcGIS. В западной части отмечаются участки совпадения повышенных значений МС и пониженных значений содержания гексана. В окрестности продуктивной скважины Недильная-1 зафиксировано повышенные значения МС, а в окрестности непродуктивной Недильная-2 значения МС являются средними по величине. Для содержания гексана рядом с обеими скважинами фиксируются максимумы. Корреляционный анализ показателей МС и содержания гексана в почвах показал наличие средней отрицательной связи: $R = -0,4$ ($n = 28$, $p < 0,05$, $r \geq 0,3233$). Углеводороды и продукты их окисления имеют значительную миграционную подвижность, что приводит к формированию аутогенных магнитных минералов от зоны залежи до почвенного покрова, и проявляется в виде аномальных значений магнитной восприимчивости, остаточной намагниченности и других магнитных параметров.

Ключевые слова: уплотненные породы, нефть, газ, углеводороды, почвы, магнетизм окружающей среды, магнитная восприимчивость, намагниченность.

УДК 550.3:551:534.8

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.07>

А. Садчиков, канд. техн. наук, ст. препод.,

E-mail: a.sadchikov@kstu.kz;

Н. Желаетова, магистр, ст. препод.,

E-mail: gnipnv@gmail.com;

Ж. Токушева, магистр, ст. препод.,

E-mail: jtokusheva@mail.ru;

М. Пономарева, канд. техн. наук, доц.,

E-mail: mv_ponomareva18@mail.ru;

Карагандинский государственный технический университет,

пр. Н. Назарбаева, 56, г. Караганда, 100027, Казахстан

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕЙСМОТОМОГРАФИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗАДАЧ В ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОМ НАПРАВЛЕНИИ

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

Карагандинский угольный бассейн характеризуется сложным строением. Наличие геологических несогласий, таких как тектонические нарушения, разрывы, изменчивая гипсометрия пласта и др. затрудняют проведение подземных горных работ. Безопасная и производительная работа очистных забоев при подземной добыче угля предполагает заблаговременный и надежный прогноз горно-геологических условий строения и состояния угленосного массива из горных выработок. На более точную и достоверную картину тектонического строения угленосного массива позволяет получить использование методов шахтной сейсморазведки для изучения геологического строения и условий залегания угольного пласта и вмещающих пород.

Основной целью внедрения современных методов шахтной сейсморазведки было проведение математического моделирования для оценки возможности выделения тектонической нарушенности с амплитудой смещения порядка и выше мощности пласта, с использованием различных методов подземной сейсморазведки – метода сейсмического просвечивания (МСП) и метода отраженных волн (МОВ).

Для этого были разработаны физические модели участков угленосного массива, включающие в себя геометрическое описание геологических структур, распределение плотностей пород, скоростей распространения волн и их влияние на сжатие и сдвиг горного массива. Одна из моделей соответствовала участку пласта без геологических нарушений, а вторая – участку с тектоническими нарушениями с амплитудами смещения от 5 до 15 м.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке современных эффективных методик прогноза состояния горного массива в сложных горно-геологических условиях как Карагандинского угольного бассейна, так и других угольных бассейнов, имеющих сложное геологическое строение.

Первоначально сейсморазведочные работы выполнялись методом отраженных волн по методике общей глубинной топки. Однако по-прежнему актуальной оставалась проблема получения объективного изображения геологической среды, связанная с особенностями возбуждения упругих волн в шахтных условиях (особенности генерируемого волнового поля, закономерности его распространения, направленность источника). Разработан и применен метод шахтной сейсморазведки, основанный на регистрации каналовых и граничных волн, позволяющий получить детальную геолого-геофизическую модель участка месторождения. За счет обработки обоих типов волн достигается повышение разрешающей способности метода и возможность получения информации как об угольном пласте, так и о вмещающих его породах, в частности состоянии кровли пласта.

В работе приведена методика измерений в шахтных условиях, показаны результаты ее опробования при выполнении полевых работ в условиях шахт, получены сейсмические характеристики с высокой контрастностью и четкой прослеживаемостью отражающих границ.

Ключевые слова: Карагандинский угольный бассейн, тектонические нарушения, шахтная сейсморазведка, направленность источника, поперечные волны, каналовые и граничные волны.

Основной проблемой изучения строения угольных пластов, связанной с добычей угля в шахтах, является недостаток геологической информации. С появлением компьютеров и цифровой записи сигнала появилась возможность применять новые методы измерений и обработки информации. Так, в мировой практике внедрен метод сейсмотомографии, который стал использоваться как с поверхности, так и в шахтах (Туркель, 2005; Азаров и Яковлев, 1988; Глухов и др., 1994; Садчиков и др., 2016).

На рис. 1 приведена схема прохождения и регистрации отраженной и просвеченной волн. Из рисунка видно, что сейсмическая волна, проходя через нарушенные зоны, отражается от них (отраженные волны) и проходит сквозь них (прямые волны). При методе отраженных волн сигнал выходит из пункта возбуждения 2 (ПВ 2) и происходит регистрация сигнала, отраженного от какой-либо поверхности в пунктах приема 2 и 3 (ПП 2 и ПП 3). Но если нет информации о скорости волны, то место расположения и границы нарушенного участка будут определены не точно. В методе сейсмического просвечивания сигнал выходит из пункта возбуждения 1 (ПВ 1), а регистрируется в пункте приема 1 (ПП 1). Исходя из данной схемы, зная расстояние и время прохождения регистрируемого сигнала, можно вычислить скорость прохождения волны. Этот метод дает более достоверную информацию как о

расположении нарушенной зоны, так и о ее параметрах, таких как размеры зоны, амплитуда смещения угольного пласта и др.

В целом сейсморазведка для решения шахтных задач в мире применяется достаточно широко, как при наземных, так и при подземных (шахтных) исследованиях (Глухов и др., 1994; Садчиков и др., 2016; Анциферов, 2002; Азаров и Яковлев, 1988; Савич и др., 1969; Бабкин, 2010; Zhou et al., 2014; Barthwal and van der Baan, 2019; Lu et al., 2016; Greenhalgh et al., 2016). Шахтная сейсморазведка проводится с целью изучения геологического строения и решения горнотехнических задач и выполняется с исследованием как продольных (Р), так и поперечных (S) волн (Туркель, 2005; Азаров и Яковлев, 1988; Бабкин, 2010; Lu et al., 2016; Greenhalgh et al., 2016).

Прогноз строения горного массива сейсмическим методом просвечивания опирается на использование наборов критериев, свидетельствующих о наличии тех или иных геологических структур и аномалий. При этом одним из наиболее эффективных подходов в определении характеристик аномалий является сейсмическая томография. В шахтной сейсморазведке при использовании метода сейсмического просвечивания (МСП) широко используются методы томографии, основанные на следующем подходе.

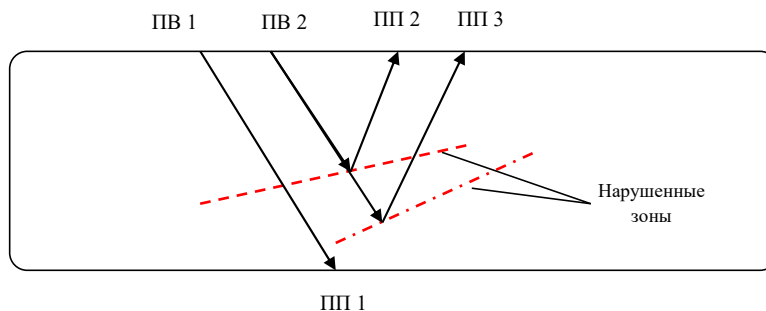


Рис. 1. Схема прохождения отраженных и прямых волн

Исследуемый участок разбивается на зоны eij (рис. 2). Для каждой из eij выбирается совокупность K сейсмотрасс, лучи которых проходят через данную зону. На основе значений характеристик A_k (полученных в результате обработки информативных волновых пакетов сейсмотрасс), длин путей лучей от источника до приемника R_k и длин их путей rk, ij по eij оценивается то значение характеристики A_{ij} , которое было бы у сейсмотрасс в том случае, если бы вся среда имела бы такие же параметры, как в зоне eij . При этом предполагается, что любые составляющие сейсмотрассу колебания проходят один и тот же путь вдоль ее луча. Этот чрезвычайно эффективный метод прогноза горногеологических условий залегания угля не находит распространения при решении задач наземной сейсморазведки, базирующейся на анализе характеристик отраженных и преломленных волн. При этом характерно, что колебания за один и тот же временной промежуток могут попасть от пункта возбуждения (ПВ) к сейсмоприемнику (СП) разными путями, проходя при этом различные расстояния.

Адаптация метода сейсмической томографии на проходящих волнах для решения задач наземной сейсморазведки является чрезвычайно актуальной задачей, решение которой позволило бы повысить эффективность и качество сейсмического прогноза. В данной статье обоснована возможность решения данной проблемы и приведены примеры практического применения вышеуказанного подхода.

Сейсмическую томографию можно трактовать как процедуру моделирования пространственного распределения свойств среды на основе анализа регистрируемых значений характеристик волнового поля (здесь и далее будем обозначать их как V – скорость и A – амплитуда). Классическим примером можно считать расчет распределения скоростных показателей среды путем анализа скоростей прихода волновых пакетов. Широкое распространение данного подхода обусловлено тем, что скорости регистрируемых волновых пакетов непосредственно определяются геометрией участков исследуемой толщи пород и их скоростными характеристиками.

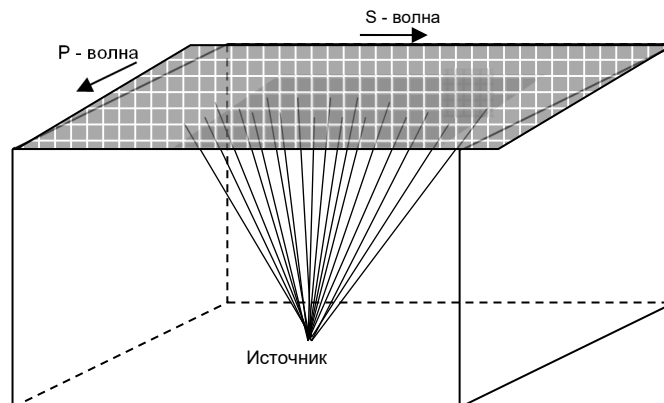


Рис. 2. Основы метода сейсмотомографии

Принципы применения амплитудной томографии существенно отличаются от принципов скоростной. Амплитуда регистрируемых волновых пакетов зависит от целого ряда факторов.

Одной из наиболее важных регистрируемых характеристик волновых пакетов является скорость первых вступлений. Ее можно рассчитать по формуле среднего значения

$$V_n = \frac{L}{t} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{V_i}}, \quad (1)$$

где L – общая длина сейсмического луча; L_i – длина луча; V_i – скорость распространения волны исследуемого типа в зоне eij ; t – время движения волны.

Амплитуда волновых пакетов зависит от целого ряда параметров (Туркель, 2005; Азаров и Яковлев, 1988; Глухов и др., 1994).

Во-первых, это естественное расхождение фронта колебаний при удалении от источника. Степень расхождения фронта волны зависит в первую очередь от ее природы.

В шахтной сейсморазведке широко используются интерференционные граничные и каналовые (нормальные) волны, образованные в результате каналирования колебательной энергии пластами полезных ископаемых (напр., уголь, горючие сланцы). Они имеют иные законы убывания. В дальней зоне изменение потенциала каналовых волн описывается законом

$$A = \frac{1}{\sqrt{r}}, \quad (2)$$

а граничных (Туркель, 2005; Азаров и Яковлев, 1988; Глухов и др., 1994; Анциферов, 2002)

$$A = \frac{1}{\sqrt{r^2}}. \quad (3)$$

Во-вторых, это изменение амплитуды за счет поглощения средой колебательной энергии, которое описывается законом

$$A = \exp(-\beta \cdot r), \quad (4)$$

где коэффициент поглощения β также зависит от типа волн (каналовые, граничные и т.д.), их поляризации и частоты. Указанные зависимости достаточно хорошо изучены как теоретически, так и практически (Азаров и Яковлев, 1988; Анциферов, 2002; Савич и др., 1969).

В-третьих, это характеристики направленности источников и приемников сейсмических колебаний, учет которых не представляет сложности, поскольку данная информация является априори известной.

В-четвертых, это условия контакта источников колебаний и сейсмоприемников со средой. Обеспечение единообразия условий контакта представляет собой чрезвычайно сложную задачу. В общем случае для ее решения приходится использовать усреднение по многократным возбуждениям сигнала на каждой из стоянок.

В-пятых, это рассеяние колебательной энергии на любых неоднородностях толщи горных пород. Это чрезвычайно сложный фактор, поскольку речь идет как об известных априори неоднородностях, так и о неизвестных, в том числе о тех, которые являются объектом исследований.

Таким образом, исходя из вышесказанного с учетом зависимостей (2, 3, 4), можно сделать выводы, что амплитуда, а следовательно, и энергетическая составляющая каналовой волны выше, чем у граничной волны, в связи с чем информативность данных при регистрации каналовых волн лучше. Так же при обработке результатов, учитывающих энергетическую составляющую (амплитуду сигнала), необходимо принимать во внимание потерю энергии при прохождении волной расстояния. Другими словами, надо вводить поправки с учетом длины пути проходимой сейсмической волной.

Сейсмические лучи, проходящие через горный массив, встречают на своем пути аномальные изменения этого массива, такие как тектонические нарушения, размывы, скопления воды и газа. Эти лучи претерпевают изменения своих параметров: времени прохождения, частоты колебания, амплитуды волны и др. Таким образом, это дает возможность выделять "нарушенные" и "ненарушенные" участки массива.

Обнаружение и трассирование малоамплитудной тектонической нарушенности угольных пластов с высокой степенью детальности перед непосредственным проведением горных работ остается актуальной задачей, несмотря на хорошую изученность тектонического строения массива на этапе разведки и доразведки угольных месторождений. На безопасность труда и эффективность отработки угольных пластов большое влияние оказывают малоамплитудные разрывные нарушения угольных пластов с амплитудой смещения до 10–15 м и протяженностью до 250–300 м. Достоверность выявления таких нарушений по данным бурения весьма низка и сведения о них носят предположительный характер. Повышение достоверности прогноза разрывных нарушений угольных пластов бурением геологоразведочных скважин по густой сетке приводит к значительному удорожанию работ, и пропуск таких нарушений является скорее обычным явлением, чем исключением (Кенжин и др., 2009).

Начиная с 80-х гг. XX ст. в Карагандинском угольном бассейне начали проводиться работы по определению геологической нарушенности угольного массива современными методами сейсмотомографии. Работы производились отрядом шахтной геофизики в составе экспедиции "Карагандауглераведка". MDGB, а в дальнейшем – "Дружба".

Конвейерный штрек 14В-К₁₄-

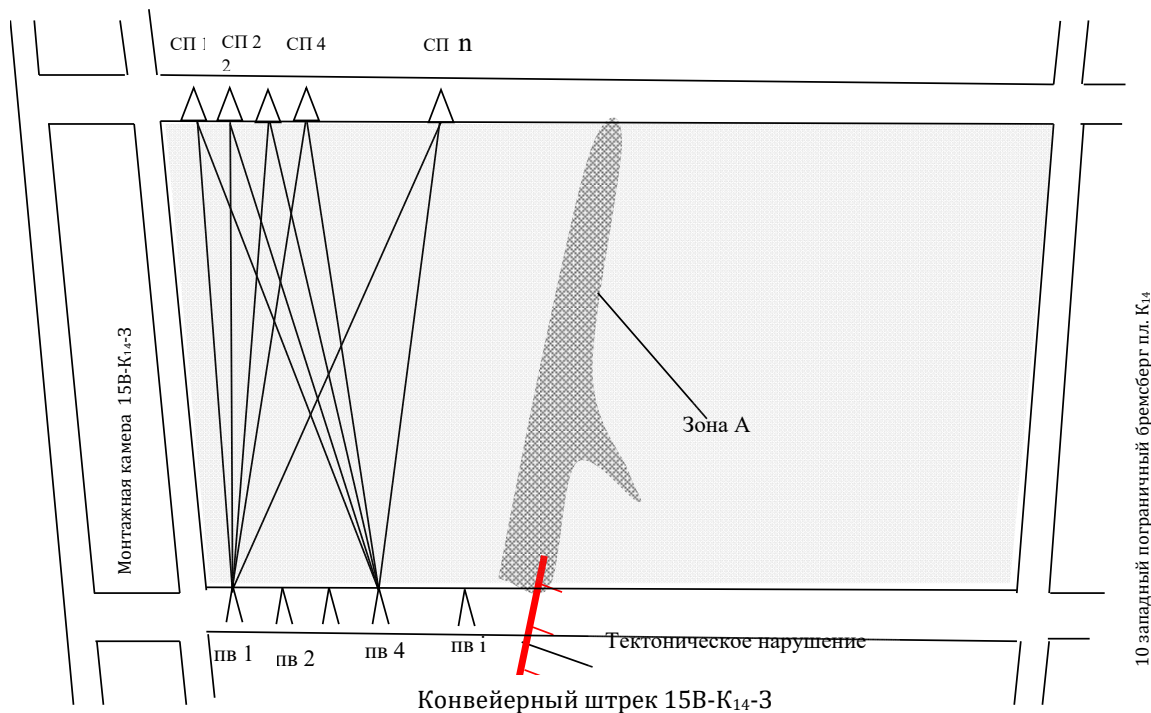


Рис. 3. Схема измерений и результат исследований геофизических работ в лаве 15В-К₁₄-3 (шахта им. 50-летия Октябрьской революции)

Карагандинский угольный бассейн является одним. Сначала работы проводились с применением аналоговых сейсмостанций ("Тектоника-1"), а с середины 80-х – цифровых сейсмостанций из газообильных. Подавляющее число шахт Карагандинского бассейна сверхкатегорные. В геологическом строении бассейна принимают участие палеозойские, мезозойские и кайнозойские образования. Карагандинский бассейн принадлежит к типу бисистемных: угленосность связана с каменноугольными и юрскими отложениями. Угли юрского возраста – бурые и разрабатываются открытым способом. Угли карбонового возраста – каменные и представляют промышленный интерес. Угленосные отложения карбона включают в себя четыре угленосные свиты: Ашлярикскую, Карагандинскую, Долинскую и Тентекскую (Кенжин и др., 2009).

Каждая свита представлена пластами сложного геологического строения с различными геологическими несогласиями.

На рис. 3 показаны схема и результат измерений в лаве 15В-К₁₄-З на шахте им. 50-летия Октябрьской революции. Измерения производились в конвейерном штреке 14В-К₁₄-З, а пункты возбуждения сейсмических колебаний находились в конвейерном штреке 15В-К₁₄-З. Расстояние между сейсмодатчиками составляло 5 м. Такое же расстояние (5 м) было между пунктами возбуждения. После обработки результатов методом сейсмической томографии можно выделить зону А (рис. 3). Зона соответствует пониженным значениям скорости сейсмической волны. Можно сделать вывод, что зона А соответствует тектоническому нарушению, подсеченного в конвейерном штреке 15В-К₁₄-З, что было подтверждено после отработки лавы.

В заключении можно сделать вывод, что теоретические основы метода сейсмической томографии регистрации просвеченных волн и практическая реализация этого метода и методики измерения дают возможность утверждать о преимуществе данного метода над методом отраженных волн.

Список использованных источников

- Азаров, Н.Я., Яковлев, Д.В. (1988). Сейсмоакустический метод прогноза горно-геологических условий эксплуатации угольных месторождений. Москва : Недра.
- Анциферов, А.В. (2002). Теория и практика шахтной сейсморазведки. Донецк : Алан.
- Бабкин, А.И. (2010). Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 1, 261–267.
- Бабкин, А.И. (2001). Шахтная сейсмоакустика по методике многократных перекрытий (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей). *Дис. ... канд. техн. наук*. Пермь : Горный институт УрО РАН.
- Боганик, Г.Н., Гурвич, И.И. (2006). Сейсморазведка: учебник для вузов. Тверь : АИС.
- Глухов, А.А., Захаров, В.Н., Рубан, А.Д. (1994). Моделирование волнового поля в задачах шахтной сейсморазведки методом конечных разностей. *Горный вестник*. Москва : ИГД Скопинского, 16–18.
- Кенжин, Б.М., Смирнов, Ю.М., Цай, Б.Н., Мустафин, Р.К., Саттаров, С.С. (2009). Проведение шахтных сейсмоакустических экспериментов в условиях мощных пластов Карагандинского угольного бассейна. *Наукові праці УкрНДМІ НАН України*, 5 (1), 276–284.
- Кулагов, Е.В. (2012). Особенности сейсмических волн, возбуждаемых в массиве соляных пород на Старобинском месторождении. *Літасфера*, 2 (37).
- Пригара, А.М. (2003). Прогноз строения и свойств горного массива на основе сейсмомоделирования. *Дис. ... канд. техн. наук*. Пермь : Горный институт УрО РАН.
- Савич, А.И., Коптев, В.И., Никитин, В.Н., Яценко, З.Г. (1969). Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. Москва : Недра.

Садчиков, А.В., Пономарева, М.В., Талерчик, М.П. (2016). Исследование горного массива отработанных шахт. *Труды Университета*, Караганда : КартТУ, 3, 48–50.

Санфиров, И.А., Бабкин, А.И. (2003). Горно-геологические приложения сейсморазведочных исследований во внутренних точках среды. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 10.

Тиркель, М.Г. (2005). Новый вариант томографии при сейсмическом прогнозе строения горного массива. Донецк: УкрНИИ НАН Украины, 78–83.

Царев, Р.И., Пригара, А.М., Жуков, А.А. (2019). Возможности сейсморазведки на поперечных волнах. *Материалы конференции EAGE "Инженерная и рудная геофизика"*. Геленджик.

Zhou, B., Hatherly, P., Peters, T. (2014). Cola seismic surveying over near-surface basalts. Experience from Central Queensland, Australia. *Geophysics*, 79, 2, B109–B122.

Barthwal, H., van der Baan, M. (2019). Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity. *Geophysics*, 84, 1, B41–B57.

Lu, J., Meng, X., Wang, Yu. (2016). Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China. *Geophysics*, 81, 5, B149–B165.

Greenhalgh, S.A., Masonz, I. M., Sinadinovski, C. (2016). In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*, 65, 6, 1908–1919.

References

- Azarov, N.YA., Yakovlev, D.V. (1988). Seismoakusticheskiy metod prognoza gorno-geologicheskikh usloviy ekspluatatsii ugolnykh mestorozhdeniy. Moskva: Nedra.
- Antsiferov, A.V. (2002). Teoriya i praktika shahtnoy seysmorazvedki. Donetsk : Alan.
- Babkin, A.I. (2010). Spatial interference systems of seismoacoustic observations in the conditions of potash mine workings. *Mining information and analytical Bulletin*, 1, 261–267. [in Russian]
- Babkin, A.I. (2001). Mine seismoacoustics using the method of multiple overlaps (on the example of the Verkhnekamskoye potash deposit). *Thesis ... Cand. Sci. (Tech.)*. Perm: Mining Institute Ural branch of the RAS. [in Russian]
- Zhou, B., Hatherly, P., Peters, T. (2014). Cola seismic surveying over near-surface basalts. Experience from Central Queensland, Australia. *Geophysics*, 79, 2, B109–B122.
- Boganik, G.N., Gurvich, I.I. (2006). Seysmorazvedka: uchebnyk dlya vuzov. Tver : AIS.
- Gluukhov, A.A., Zakharov, V.N., Ruban, A.D. (1994). Modeling of the wave field in the problems of mine seismic exploration using the finite difference method. *Mining messenger*. Moscow: Skochinsky Institute of mining, 16–18. [in Russian]
- Barthwal, H., van der Baan, M. (2019). Passive seismic tomography using recorded microseismicity: Application to mining-induced seismicity. *Geophysics*, 84, 1, B41–B57.
- Lu, J., Meng, X., Wang, Yu. (2016). Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data. A case history from China. *Geophysics*, 81, 5, B149–B165.
- Kenzhin, B.M., Smirnov, Y.M., Tsai, B.N., Mustafin, R.K., Sattarov, S.S. (2009). Conducting mine seismoacoustic experiments in the conditions of powerful layers of the Karaganda coal basin. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy*, 5 (1), 276–284. [in Russian]
- Kulakov, E.V. (2012). Features of seismic waves excited in an array of salt rocks at the Starobinskoye field. *Litasfera*, 2 (37). [in Russian]
- Prigara, A.M. (2003). Forecast of the structure and properties of a mountain range based on seismic modeling. *Thesis ... Cand. Sci. (Tech.)*. Perm: Mining Institute, Ural branch, RAS. [in Russian]
- Savich, A.I., Koptev, V.I., Nikitin, V.N., Yashchenko, Z.G. (1969). Seismoakusticheskie metody izucheniya massivov skalnykh porod. Moskva: Nedra.
- Sadchikov, A.V., Ponomareva, M.V., Talerchik, M.P. (2016). Research of the mountain range of spent mines. *Writings of the University*, Karaganda: KSTU, 3, 48–50. [in Russian]
- Sanfirov, I.A., Babkin, A.I. (2003). Mining and geological applications of seismic surveys in the interior of the environment. *Mining information and analytical Bulletin*, 10. [in Russian]
- Greenhalgh, S.A., Masonz, I. M., Sinadinovski, C. (2016). In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*, 65, 6, 1908–1919.
- Tirkel, M.G. (2005). A new version of tomography for seismic prediction of the structure of a mountain range. Donetsk: UkrRIMGS of the NAS of Ukraine, 78–83. [in Russian]
- Tsarev, R.I., Prigara, A.M., Zhukov, A.A. (2019). The possibility of seismic shear waves. *Materials of the EAGE conference "Engineering and ore Geophysics"*. Gelendzhik. [in Russian]

Надійшла до редакції 29.07.2020

A. Sadchikov, PhD (Tech.), Senior Lect.,
E-mail: a.sadchikov@kstu.kz;
N. Zhelaeva, master, Senior lecturer,
E-mail: gnipnv@gmail.com;
J. Tokusheva, master, Senior lecturer,
E-mail: jtokusheva@mail.ru;
M. Ponomareva, PhD (Tech.), Associate. prof.,
E-mail: mv_ponomareva18@mail.ru;
Karaganda state technical University,
56 N. Nazarbayev Ave., Karaganda, 100027, Kazakhstan

APPLICATION OF SEISMOTOMOGRAPHY METHODS FOR SOLVING VARIOUS PROBLEMS IN THE MINING AND GEOLOGICAL DIRECTION

The Karaganda coal basin is characterized by a complex structure. The presence of geological inconsistencies such as tectonic disturbances, washouts, variable reservoir hypsometry, etc. makes it difficult to conduct underground mining operations. Currently, in the world practice, mine seismic exploration is widely used for the purpose of studying the geological structure and solving various mining problems.

Safe and productive operation of treatment faces in underground coal mining requires a timely and reliable forecast of the mining and geological conditions of the structure and condition of the coal-bearing mass from the mine workings. The most accurate and reliable picture of the tectonic structure of the Carboniferous massif can be obtained using methods of mine seismic exploration to study the geological structure and conditions of the coal bed and host rocks.

The main goal of implementing modern methods of mine seismic exploration was to conduct mathematical modeling to assess the possibility of identifying tectonic disturbances with an offset amplitude of the order of magnitude and higher than the reservoir capacity using various methods of underground seismic exploration - the seismic transmission method (STM) and the reflected wave method (RWM).

For this purpose, physical models of sections of the Carboniferous massif were developed, including a geometric description of geological structures, the distribution of rock densities, velocities, wave propagation and their influence on compression, and the shift of the mountain range. One of the models corresponded to a section of the formation without geological disturbances, and the second one - to a section with tectonic disturbances with displacement amplitudes from 5 to 15 m.

The results obtained can be used in the development of modern effective methods for predicting the state of the mountain range in complex mining and geological conditions of both the Karaganda coal basin and other coal basins with a complex geological structure.

Initially, seismic surveys were performed using the method of reflected waves using the common depth point method. However, the problem of obtaining an objective image of the geological environment is still relevant, due to the peculiarities of elastic wave excitation in mine conditions (features of the generated wave field, patterns of its propagation, the direction of the source). The method of mine seismic survey based on channel and boundary waves registration was developed and applied. This method allows obtaining a detailed geological and geophysical model of the field site. Due to the processing of both types of waves, the resolution of the method is increased to obtain information about both the coal bed and the host rocks, and, in particular, the state of the roof of the formation.

The method of measurements in mine conditions is presented, the results of testing the method of performing field work in mine conditions are shown, and seismic characteristics with high contrast and clear traceability of reflecting boundaries are obtained.

Keywords: Karaganda coal basin, tectonic disturbances, mine seismic survey, source orientation, transverse waves, channel and boundary waves.

А. Садчиков, канд. техн. наук, ст. викл.,
E-mail: a.sadchikov@kstu.kz;
Н. Желаяева, магістр, ст. викл.,
E-mail: gnipnv@gmail.com;
Ж. Токушева, магістр, ст. викл.,
E-mail: jtokusheva@mail.ru;
М. Пономарьова, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: mv_ponomareva18@mail.ru;
Карагандинський державний технічний університет,
пр. Н. Назарбаєва, 56, м. Караганда, 100027, Казахстан

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ СЕЙСМОТОМОГРАФІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ РІЗНИХ ЗАВДАНЬ У ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНОМУ НАПРЯМІ

Карагандинський вугільний басейн характеризується складною будовою. Наявність геологічних неузгоджень, таких як тектонічні порушення, розмиви, мінлива гіпсометрія пласта та інші, ускладнює проведення підземних гірничих робіт. Безпечна і продуктивна робота очисних вибоїв при підземному видобутку вугілля передбачає завчасний і надійний прогноз гірничо-геологічних умов будови і стану вуглепородного масиву у гірничих виробках. Найбільш точну і достовірну картину тектонічної будови вуглепородного масиву дозволяють отримати методи шахтної сейсморозвідки для вивчення геологічної будови і умов залягання вугільного пласта і вмісних порід.

Основним завданням впровадження сучасних методів шахтної сейсморозвідки було проведення математичного моделювання для оцінки можливості виділення тектонічної порушеності з амплітудою зміщення порядку і вище потужності пласта, з використанням різних методів підземної сейсморозвідки – методу сейсмічного просвічування і методу відбитих хвиль.

Для цього було розроблено фізичні моделі ділянок вуглепородного масиву, що включають у себе геометричний опис геологічних структур, розподіл щільності порід, швидкостей поширення хвиль та їхній вплив на стискання і зрушення гірського масиву. Одна з моделей відповідала ділянці пласта без геологічних порушень, а друга – ділянці з тектонічними порушеннями з амплітудами зміщення від 5 до 15 м.

Отримані результати можуть бути використані за розробки сучасних ефективних методик прогнозу стану гірського масиву в складних гірничо-геологічних умовах як Карагандинського вугільного басейну, так і інших вугільних басейнів, що мають складну геологічну будову.

Спочатку сейсморозвідувальні роботи виконувалися методом відбитих хвиль за методикою загальної глибинної точки. Однак, як і раніше, актуальною залишалась проблема отримання об'єктивного зображення геологічного середовища, пов'язана з особливостями збудження пружних хвиль у шахтних умовах (особливості генерованого хвильового поля, закономірності його поширення, спрямованість джерела). Розроблено і застосовано метод шахтної сейсморозвідки, оснований на ресстрації каналових і граничних хвиль, що дозволяє отримати детальну геолого-геофізичну модель ділянки родовища. За рахунок обробки обох типів хвиль досягається підвищення роздільної здатності методу, що дозволяє отримати інформацію як про вугільний пласт, так і про вмісні його породи, зокрема про стан покрівлі пласта.

У роботі наведено методику вимірювань в шахтних умовах, показано результати випробування методики при виконанні польових робіт в умовах шахт, отримано сейсмічні характеристики з високою контрастністю і чіткою простежуваністю відбивних меж.

Ключові слова: Карагандинський вугільний басейн, тектонічні порушення, шахтна сейсморозвідка, спрямованість джерела, поперечні хвилі, каналові та граничні хвилі.

УДК 550.834

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.08>С. Вижва¹, д-р геол. наук, проф.,E-mail: vsa@univ.kiev.ua;І. Михалевиць^{1,2}, асп., заст. голов. геолога,E-mail: i.mykhalevych@kub-gas.com.ua;¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна;²ТОВ "КУБ-ГАЗ", вул. Рилсєва, 10, а, м. Київ, 04073, Україна

КОМПЛЕКСНІ КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЛІТОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ БУРІННЯ ПОШУКОВИХ СВЕРДЛОВИН НА ПІВНІЧНОМУ БОРТІ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

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

Обговорюється процес вибору базових критеріїв для оцінки доцільності буріння на літологічні об'єкти в межах північного борту Дніпровсько-Донецької западини. Детально описуються типи аналізів, які потрібно провести для визначення доцільності буріння пошукової свердловини на такі об'єкти. Наведено приклади літологічних об'єктів із структурним контролем і з його відсутністю в московських і башкирських відкладах ДДЗ. Показано реальний приклад успішного виявлення літологічних об'єктів у межах продуктивних горизонтів М-6 та М-7. Висновки проведеної роботи були підтверджені практичними результатами пошукового буріння. Продемонстровано особливості аналітичних підходів за умови присутності аномалій у сейсмічному хвильовому полі за різними сейсмічними атрибутами (пре-стек і пост-стек). Основним інструментом для роботи з неструктурними тілами є детальна кількісна інтерпретація сейсмічних даних за виділеними об'єктами. Базуючись на матеріалі, описаному в статті, надано рекомендації проведення щонайменше AVO-досліджень та інверсій до підсумовування (pre-stack inversion). Якщо всі кількісні атрибути демонструють однаково позитивний результат, такий об'єкт слід рекомендувати до пошукового буріння. Якщо ж різні методи дають різні результати, це вказує на високу імовірність водонасичення горизонтів навіть за умови сприятливої літологічної характеристики. Виділено альтернативні три головні критерії, на яких може базуватись оцінка літологічних об'єктів і прийматись рішення щодо доцільності пошукового буріння. Цими критеріями в межах північного борту ДДЗ є: 1) форма сейсмічної аномалії – чим більш вона мозаїчна, тим більша імовірність того, що вона утворюється за рахунок залишкового / незначного газонасичення або обумовлена особливостями обробки / польової зйомки; 2) площа сейсмічної аномалії (доведені бурінням сейсмічні аномалії в районі північного борту ДДЗ зазвичай мають площу від 1 км²); 3) співвідношення сейсмічної аномалії з даними свердловин, що були пробурені раніше (та їхніми результатами в конкретних горизонтах), і негативними структурними аномаліями типу мініпрогинів.

Ключові слова: AVO-дослідження, інверсійні перетворення, літологічні об'єкти, критерії оцінки.

Вступ. На сучасному етапі розвитку світової економіки потреба на енергоносії постійно зростає. Паралельно із цим значно зменшуються запаси/ресурси вуглеводнів з традиційних структурних пасток, і виникає необхідність працювати з пастками неструктурного та комбінованого типів. Варто зазначити, що інструментарій кількісної інтерпретації сейсмічних даних у світовій виробничій практиці дає все більше можливостей для прогнозування літології та насичення колекторів. Зважаючи на це, необхідним є процес імплементації цих знань й у межах України, зокрема для території Дніпровсько-Донецької Западини.

Безумовний прогрес у розвитку методів додатково дає нам можливість ефективно використовувати такі інструменти, як електророзвідка, гравірозвідка, магнетотилурика та геохімічна зйомка. Проте на етапі планування закладання свердловин для глибокого буріння всі вони використовуються лише в комплексі із сейсморозвідкою. Незважаючи на велику кількість додаткових методів, головним раціональним інструментом для вибору свердловини є якісна та кількісна інтерпретація 2D або 3D сейсміки. В Україні всі добре знайомі з якісною інтерпретацією, тобто створенням структурно-геологічної моделі (виокремлення структур і порушень), але з кількісною інтерпретацією не все так просто та однозначно. І якщо такі речі, як AVO-дослідження (Veeken and Silva, 2004), методи інверсій (Verwest et al., 2000), спектральна декомпозиція (Rutherford and Williams, 1989; Кузьменко та Додух, 2019) та інші види атрибутивного аналізу вже давно входять до обов'язкового пакету сейсмічних досліджень провідних світових компаній, то в Україні практика їхнього застосування перебуває на неналежному рівні. Це пов'язано з низкою об'єктивних факторів, серед яких геологічні особливості регіону досліджень та якість вхідних сейсмічних і свердловинних даних, здебільшого відпрацьованих до 1990 р.

Зважаючи на те, що великі антиклінали, об'єкти біля соляних штоків та об'єкти, що приурочені до різнотипових скидів на глибинах до 5 км уже здебільшого практично

повністю розвідані, то векторами розвитку пошукового буріння в Україні в майбутньому можуть бути буріння на глибини понад 5 км і пошук перспективних літологічних об'єктів (Кривошеєв та ін., 2019).

Крім того, важливим убачається комплексування з моделюванням петрофізичних параметрів (Вижва та ін., 2018; Onanko et al., 2011; Prodaivoda et al., 2020), а також результатами приповерхневих геофізичних вишукувань (Menshov et al., 2016; Menshov et al., 2020).

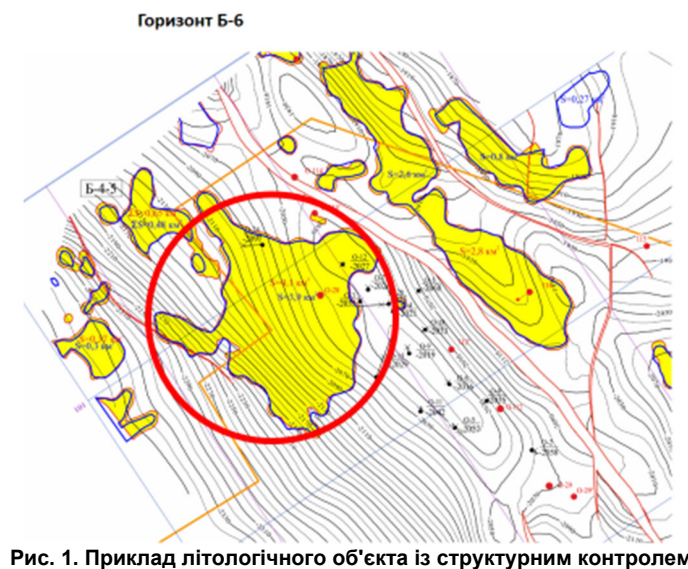
Типовий об'єкт дослідження та отримані результати. Як показують результати пошукового буріння в межах невеликого полігону північного борту ДДЗ (площею близько 500 км²), тут існують і кількісно виділяються літологічні об'єкти як без структурного контролю так і з ним. Про те, які правильні алгоритми до їхнього аналізу можуть бути застосовані, і йтиметься далі на прикладі конкретної умовної свердловини № М-30 (альтернативна назва – № MS-1) на продуктивні горизонти московського ярусу середнього карбону. Свердловина була рекомендована до буріння та реалізована командою фахівців, які мали успішний досвід роботи із схожими об'єктами на цій території. На жаль, після буріння її підсумкові негативні результати ще раз доводять, наскільки важливим є комплексний та критичний аналіз усіх можливих даних при роботі з літологічними газонасиченими тілами. Метою цієї роботи є встановлення базових критеріїв для оцінки доцільності буріння на схожі об'єкти.

Підставою для буріння цієї свердловини, про яку далі йтиметься, було попереднє успішне виявлення літологічних об'єктів на згаданій території. Бурінням було підтверджено п'ять таких літологічних тіл у межах горизонтів М-2, М-3, М-4 (2 об'єкти) та Б-6 московського і башкирського ярусів. У чотирьох із п'яти об'єктів був відсутній структурний контроль у класичному його розумінні. Щоправда, у горизонтах М-2 та М-3 літологічні тіла контролювались регіональним порушенням, хоча й розташовувались в опущеному по незгідному скиду

блоці. Приклади літологічних об'єктів із структурним контролем і без нього показано на рис. 1 та 2.

Фактично обґрунтування та доцільність буріння цієї свердловини, запропонованої іноземними фахівцями, можна представити за допомогою рис. 3. На цьому рисунку продемонстровано розподіл середньоквадратичних амплітуд між продуктивними горизонтами М-6 та М-7. Із

теорії відомо, що середньоквадратична амплітуда може вказувати на зміну літології, а також мати інтегральні характеристики насичення. Головна ідея полягала в тому, що існує постійний гіпсометричний підйом горизонту до проектної свердловини. І якщо у свердловині № М-8 розкриті два газонасні горизонти з ГВК, то на 40 м гіпсометрично вище в проектній свердловині повинен бути газ.



Хоч дана концепція мала право на життя, зважаючи на певні аналоги, описані вище, було проведено більш ретельний аналіз проектної локації, і результати виявилися діаметрально протилежними. Було зроблено таке.

1) Проведено детальну інтерпретацію даних каротажу свердловини № М-8. Як наслідок встановлено, що реальна товщина газонасиченої частини продуктивного горизонту М-6 становить 14 м проти запропонованих закордонними фахівцями 18 м, а продуктивного горизонту М-7 – 7,2 м проти початкових 13 м. Таке зменшення ефективної товщини горизонтів впливає на підрахунок орієнтовної ресурсної бази цих горизонтів.

2) Ретельно проаналізовано структурний фактор.

На даній площі існують два варіанти обробки сейсмічних матеріалів 3D, виконаних вітчизняною компанією в 2012 р. і закордонною компанією в 2013 р. Також існують сейсмічні 2D матеріали, відпрацьовані на даній території до 2000 р.

Після аналізу результатів (3D сейсміки) зроблено висновки, що з точки зору кінематичної обробки, ці два варіанти суттєво відрізняються один від одного. Суттєвим

фактором, що створює різницю, є відмінності в довгоперіодних статичних і кінематичних поправках. Тому цілковитої впевненості в надійності структурних побудов тут немає. Особливо це стає ризикованим при аналізі структурного перегину між свердловиною № М-8 і № М-30, що може зменшити перспективи останньої. Яскраво виражений структурний перегин є і на 2D даних. Слід зазначити, що в минулі роки при їхньому відпрацюванні та обробці була ретельно вивчена зона малих швидкостей та розраховано відповідні статичні поправки.

Як бачимо з порівняння цих двох обробок (рис. 4), в обробці вітчизняної компанії прогин після свердловини № М-8 більш чітко виражений і, якщо розглядати цей розріз виключно зі структурної точки зору, то тут є незначний водоплаваючий поклад у куполі, розкритому свердловиною № М-8, а існування покладу на монокліналі, де планується до буріння свердловина № М-30, імовірно лише за наявності літологічно-екранованої пастки.

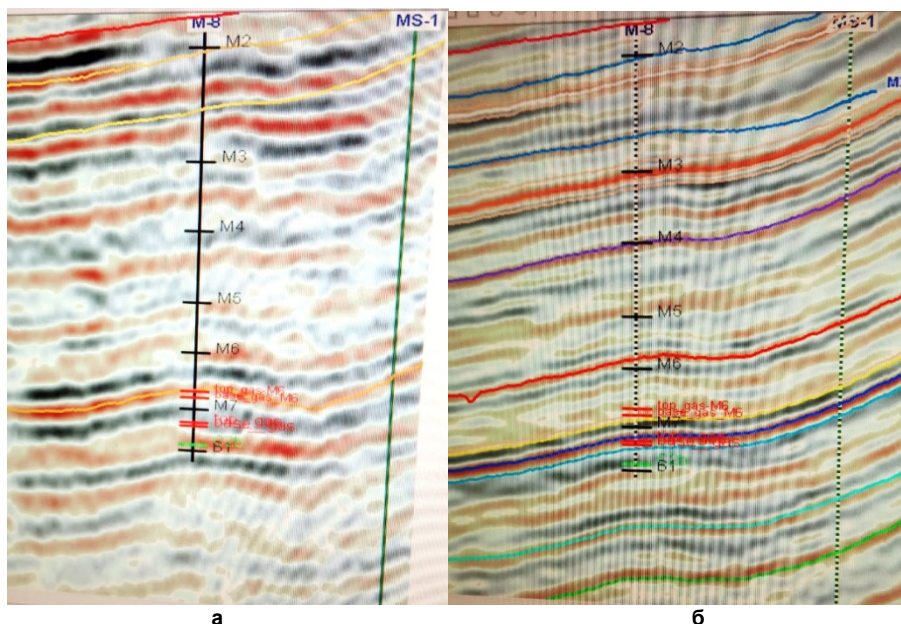


Рис. 4. Обробка сейсмічних даних вітчизняною (а) та закордонною (б) компаніями в межах свердловини № М-8 (2012–2013)

3) Якщо фахівці вважали, що амплітуда вказує на зону більш низького імпедансу колектора продуктивних горизонтів М-6-М-7 як комбінацію пористості та типів флюїду, яка впливає на швидкість та густину порід, то, на нашу думку, без надання карти акустичного імпедансу, який теж у своїх понижених значеннях не може однозначно вказувати на газонасичення інтервалу, ризики за таких підходів суттєво зростають. Знову ж таки, через те, що закордонна команда аналізувала лише пост-стек матеріали (сейсмічні куби після процедур підсумовування) щодо наявності тих чи інших амплітудних аномалій в сейсмічному хвильовому полі, ризики буріння свердловини ще збільшились.

Тому для детальнішого аналізу газонасичення було проведено AVO-дослідження та еластичну інверсію (Verwest et al., 2000). І тут (див. рис. 5 та 6) ситуація виглядає дещо інакше. На картах показано коефіцієнт Пуассона (ліворуч), структурна карта з нанесеною аномалією, що формувалася з кросплоту V_p/V_s versus A_1 (праворуч) (Henderson et al., 2008), також схематично зображена аномалія, яка виділена закордонною командою.

Дійсно, можна було сказати, що літологічне тіло там є (особливо в продуктивному горизонті М-7), однак питання його насичення вгору по моноклінальному схилу є досить неоднозначним. Насторожувала мозаїчна форма аномалії й те, що вона охоплювала собою свердловину № М-11, яка в цих горизонтах була повністю водоносною, та те, що її ознаки спостерігались і в прогині між свердловинами № М-8 і № М-30 (при тому, що ефекти газонасичення можна отримувати і в пластах із 5 % залишковою газонасиченістю).

Як наслідок, аналіз даних каротажу із свердловини № М-8 указує на необхідність зменшення газонасичених товщин імовірних горизонтів у свердловині № М-30 для підрахунку ресурсної бази на 3,6 м (продуктивний горизонт М-6) і 5 м (продуктивний горизонт М-7).

Аналіз двох різних варіантів обробки сейсмічних даних 3D указує на дискусійність структурних побудов і дає нам підставу очікувати тут лише на літологічну пастку. У свердловині № М-30 прогноз газонасичення в продуктивних горизонтах М-6 та М-7 за різними атрибутами є дуже неоднозначним (є атрибути, що вказують на газонасичення, а є такі, що його не підтверджують).

Пласт М-6. Коефіцієнт Пуассона та контури перспективних об'єктів

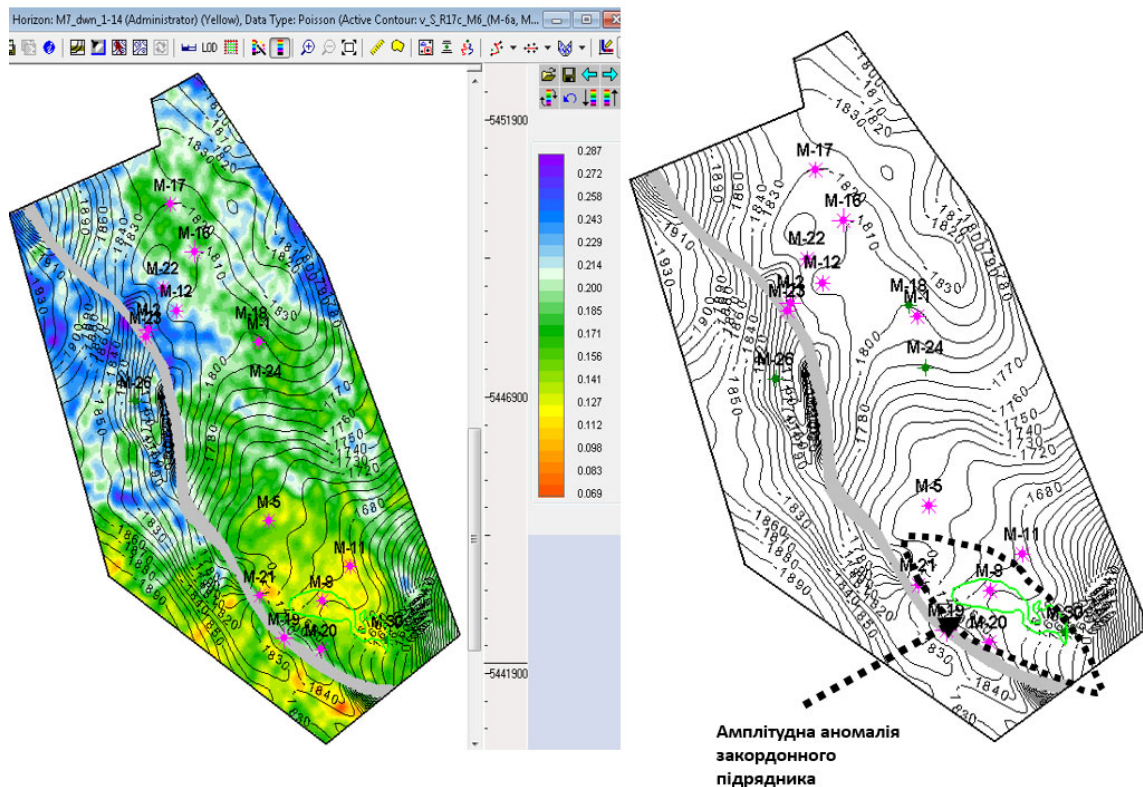


Рис. 5. Продуктивний горизонт М-6 та контури імовірної аномалії (площа 0,86 км²)

Пласт М-7. Коефіцієнт Пуассона та контури перспективних об'єктів

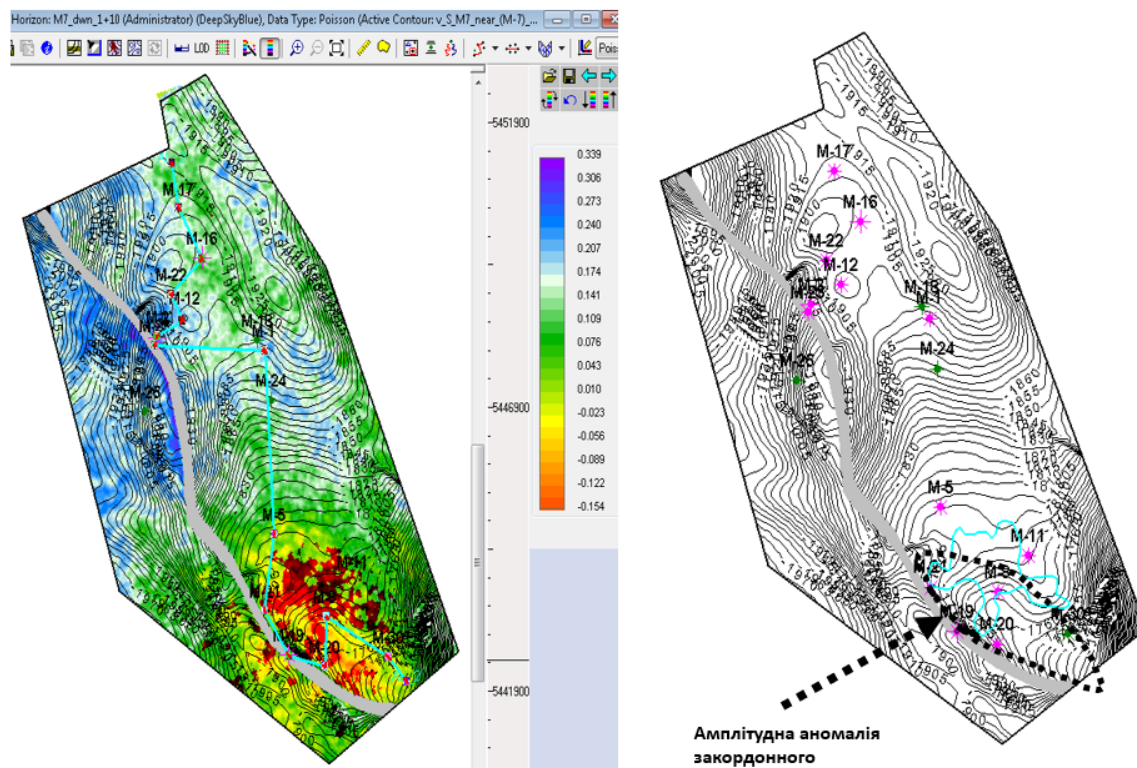


Рис. 6. Продуктивний горизонт М-7 та контури імовірної аномалії (площа 2,12 км²)

Щодо продуктивного горизонту М-6. Контури імовірної газонасичення виділеного тіла суттєво відрізняються. Площа газонасичення приблизно в три рази менша, ніж за прогнозом зарубіжних фахівців.

Відносно продуктивного горизонту М-7. Площа його газонасичення приблизно на 25 % менша від тієї, що була

описана в первинній концепції. Сейсмічна аномалія, яка виділена завдяки подальшим і глибшим дослідженням, розташована поза межами проектної свердловини № М-30. Сейсмічна аномалія, яка виділена закордонними геологами та геофізиками, охоплює зону північно-західніше від свердловини № М-8 (яка є на 100 % водонасиченою),

поширюється на свердловину № М-11, в якій було отримано воду із цього горизонту, а також указує на присутність води в прогині між куполом із свердловиною № М-8 і моноклінальним підняттям (де має бути розташована свердловина № М-30). Цей прогин, відповідно до результатів випробування продуктивного горизонту М-7 у свердловині № М-8, не може бути газонасиченим, зважаючи на розташування ГВК по продуктивному горизонту М-7. Отже, імовірніше за все тут іде річ про відображення у хвильовому полі залишкового газонасичення.

Результати робіт за трьома напрямками, описаними вище, було трансформовано в підрахунок ресурсної бази, який продемонстровано в табл. 1. Перспективи ресурсної бази при детальному аналізі зменшилися майже в сім разів. Проте, незважаючи на всі аргументи, наведені проти цієї свердловини, її таки було пробурено та отримано прогнозовано негативні результати. Установлено приблизно 15 м товщини водоносного пісковику в горизонті М-6 та 40 м у горизонті М-7.

Таблиця 1

Підрахунок ресурсів природного газу за різними способами підрахунку та оконтурювання літологічних об'єктів

	Підрахунок за контуром власних досліджень, млн м ³ (клас запасів 332)	Іноземна компанія		Підрахунок за контуром іноземних фахівців, млн м ³ (клас запасів 332)
		Р50, млн м ³	Р10, млн м ³	
Горизонт М-6б	35	82	116	142
Горизонт М-7	0	50	113	95
Сумарно	35	132	229	237

Висновки. Підсумковий результат свердловини № М-30, на перший погляд, засмучує та має негативний контекст. Проте, з іншого боку, він дає підґрунтя для виділення трьох головних критеріїв, на яких має базуватись оцінка літологічних об'єктів щодо доцільності буріння на них. Перед тим як перейти власне до критеріїв, потрібно провести три види аналізів, які дають змогу їх виділити, а саме:

- аналіз та повторна інтерпретація усіх даних: каротажів по сусідніх до проектної свердловин, повторний перегляд 2D і 3D сейсмічних матеріалів у межах перспективних горизонтів;
- детальний аналіз структурного фактора. Якщо він відсутній або його логіка викликає сумніви, це суттєво збільшує ризики буріння. У нашому випадку це призвело до буріння свердловини на 40 м гіпсометрично вище, але після локального куполу через перегин на моноклінальний схил. Отже, ресурсна база виділеного об'єкта має бути значущою, або критерій виділення беззаперечним;
- детальна кількісна інтерпретація виділених об'єктів (найголовніший при роботі з літологічними об'єктами). Базуючись на матеріалі, описаному в цій статті, ми рекомендуємо проведення щонайменше AVO-досліджень (після спеціального обґрунтування – вивчення AVO-відгуку шляхом моделювання) та однієї з інверсій до підсумовування (pre-stack inversion).

Якщо всі кількісні атрибути демонструють однаково позитивний результат, то такий об'єкт слід рекомендувати до пошукового буріння. Якщо ж різні методи дають різні результати, то це вказує на високу імовірність водонасичення горизонтів за умови сприятливої літології.

Отже, трьома головними критеріями для виділення літологічних об'єктів у межах північного борту ДДЗ є:

- 1) форма сейсмічної аномалії – чим більш вона мозаїчна, тим більша імовірність того, що вона утворюється за рахунок залишкового/незначного газонасичення або обумовлена просто особливостями обробки даних чи польової зйомки;
- 2) площа сейсмічної аномалії (доведені бурінням сейсмічні аномалії в районі північно борту ДДЗ зазвичай мають площу від 1 км²);
- 3) співвідношення сейсмічної аномалії з даними свердловин, що були пробурені раніше (та їхніми результатами в конкретних горизонтах) і негативними структурними аномаліями типу міні-прогинів. Якщо сейсмічна аномалія є там, де свердловина була водоносною або в негативному структурному елементі – це практично зводиться до нуля перспективи такого об'єкта.

Список використаних джерел

- Вихва, С., Онищук, В., Онищук, І., Рева, М., Шабатура, О. (2018). Фільтраційно-ємнісні особливості порід верхнього карбону (на прикладі Руновщинської площі ДДЗ). *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 4(83), 30–37.
- Кривошеєв, В.Т., Макогон, В.В., Іванова, Є.З. (2019). Основний резерв прискореного ефективного відкриття родовищ нафти і газу в Україні. *Мінеральні ресурси України*, 1, 31–37.
- Кузьменко, П.М., Додух, В.М. (2019). Уточнення структурно-тектонічної будови Богатоїської площі на основі спектральної декомпозиції сейсмічних даних та RGB змішування. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова галузь: Перспективи наповнення ресурсної бази" ІГГ*, 2018, 161–164.
- Castagna, J. P., Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 17, 337–342.
- Henderson, J., Purves, S.J., Fisher, G. and Leppard, C. (2008). Delineation of geological elements from RGB color blending of seismic attribute volumes. *The Leading Edge*, 27, 342–350.
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(4), 731–746.
- 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(8), 1–10.
- Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.
- Prodayvoda, 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.
- Rutherford, S.R., Williams, R.H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54, 680–688.
- Veeken, P.C.H. and Silva, M.D. (2004). Seismic inversion methods and some of their constraints. *First break*, 22, 15–38.
- Verwest, B., Masters, R., Sena, A. (2000). Elastic Impedance Inversion. *SEG Expanded Abstracts*, 19, 1580–1582.

References

- Castagna, J. P., Swan, H. W. (1997). Principles of AVO crossplotting. *The Leading Edge*, 17, 337–342.
- Henderson, J., Purves, S.J., Fisher, G. and Leppard, C. (2008). Delineation of geological elements from RGB color blending of seismic attribute volumes. *The Leading Edge*, 27, 342–350.
- Krivoshcheyev, V.T., Makogon, V.V., Ivanova, Ye.Z., (2019). Main reserve of quick and effective oil and gas field discovery in Ukraine. *Mineral resources of Ukraine*, 1, 31–37. [in Ukrainian]
- Kuzmenko, P.M., Dodukh, V.M. (2019). Elaboration of structural and tectonic structure of Bogatoyska field based on seismic data spectral decomposition and RGB blending. *Materials of International conference "Oil and gas industry: Perspectives of resource base increment" ІГГ*, 2018, 161–164. [in Ukrainian]
- Menshov, O., Kuderavets, R., Vyzhva, S., Maksymchuk, V., Chobotok, I., Pastushenko, T. (2016). Magnetic studies at Starunia paleontological and hydrocarbon bearing site (Carpathians, Ukraine). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 60(4), 731–746.
- 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(8), 1–10.
- Onanko, Y. A., Prodayvoda, G. T., Vyzhva, S. A., Onanho, A. P., Kulish, M. P. (2011). The Computerized System of Processing of Measurements of Longitudinal and Transverse Velocities of Ultrasound. *Metalofizika i noveishie tekhnologii*, 33, 529–533.

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.

Rutherford, S.R., Williams, R.H. (1989). Amplitude-versus-offset variations in gas sands. *Geophysics*, 54, 680–688.

Veeken, P.C.H. and Silva, M.D. (2004). Seismic inversion methods and some of their constraints. *First break*, 22, 15–38.

Verwest, B., Masters, R., Sena, A. (2000). Elastic Impedance Inversion. *SEG Expanded Abstracts*, 19, 1580–1582.

Vyzhva, S., Onyshchuk, V., Onyshchuk, I., Reva, M., Shabatura, O. (2018). Reservoir features of the upper carbon sediments (Runovshchynska area of the Dnieper-Donets basin). *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 4(83), 30–37. [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 19.09.2020

S. Vyzhva¹, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua;
I. Mykhalevych^{1,2}, PhD student, Deputy Chief Geologist,
E-mail: i.mykhalevych@kub-gas.com.ua;
¹Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylykivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine;
²KUB-GAS LLC, 10, a Ryleyeva Str., Kyiv, 04073, Ukraine

COMPLEX CRITERIA OF ASSESSING LITHOLOGICAL OBJECTS FOR DRILLING PROSPECTING WELLS AT THE NORTHERN EDGE OF THE DNIEPER-DONETS DEPRESSION

The article tells about the process of selecting basic criteria for assessing the expediency of drilling to prospect the lithological objects within the Northern Edge of Dnieper-Donets Depression. The work proposes detailed description of the types of analysis required in order to decide whether it is reasonable to drill a prospecting well to target the lithological object.

It offers to regard the examples of the lithological objects with and without the presence of the structural factor in Moscovian and Bashkirian deposits. A real example of successful identification of the lithological object within Moscovian horizons M-6 and M-7 has been demonstrated.

The conclusions of the performed analyses have been confirmed by the actual drilling results. Specific analytical approaches have been demonstrated upon the condition of seismic wave field anomaly presence confirmed by various seismic attributes (pre-stack and post-stack).

The main tool for working with non-structural bodies is detailed quantitative interpretation of the identified objects. Based on the described material this article recommends to perform, at least, the AVO study and pre-stack inversion. If all quantitative attributes demonstrate the same positive result, such object should be recommended for prospecting drilling. In case, different methods provide different results, it indicates high probability of water saturation in the horizons within the positive lithological conditions.

Three main alternative criteria have been identified to serve the basis for lithological objects assessment and making the decision on expediency of the prospecting drilling. Within the Northern edge of the Dnieper-Donets Depression, those three criteria are: 1) the shape of seismic anomaly – the more mosaic it is, the higher probability that it has been shaped at the account of residual/weak gas saturation or it is due to specifics of the processing/field acquisition; 2) the area of seismic anomaly (typically, seismic anomalies proven by drilling within the Northern Edge of DDD have area of 1 km² and more); 3) correlation of seismic anomaly with earlier drilled wells (and their drilling results in certain horizons) and negative mini-depression type structural anomalies.

Keywords: AVO study, inversion, lithological objects, assessment criteria

C. Выхва¹, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vsa@univ.kiev.ua;
И. Михалевич^{1,2}, асп.
E-mail: i.mykhalevych@kub-gas.com.ua;
¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
УНІ "Інститут геології", ул. Васильківська, 90, г. Київ, 03022, Україна;
²ООО "КУБ-ГАЗ", ул. Рылеева, 10? а, г. Київ, 04073, Україна

КОМПЛЕКСНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ БУРЕНИЯ ПОИСКОВОЙ СКВАЖИНЫ НА СЕВЕРНОМ БОРТУ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

Обсуждается процесс выбора базовых критериев для оценки целесообразности бурения на литологические объекты в пределах северного борта Днепровско-Донецкой впадины. Подробно описываются те типы анализов, которые нужно провести, чтобы определить целесообразность бурения поисковой скважины на такие объекты. Приведены примеры литологических объектов со структурным контролем и с его отсутствием в московских и башкирских отложениях ДДВ. Показан реальный пример успешного выявления литологических объектов в пределах московских горизонтов М-6 и М-7. Выводы после проведенной работы были подтверждены практическими результатами поискового бурения. Продемонстрированы особенности аналитических подходов при условии присутствия аномалий в сейсмическом волновом поле по разным сейсмическим атрибутам (пре-стек и пост-стек). Основным инструментом для работы с неструктурными телами является подробная количественная интерпретация выделенных объектов. Основываясь на материале, описанном в данной статье, рекомендуется проведение как минимум AVO-исследований и одной из инверсий до суммирования. Если все количественные атрибуты демонстрируют одинаково положительный результат, такой объект следует рекомендовать к поисковому бурению. Если же различные методы дают разные результаты, это указывает на высокую вероятность водонасыщения горизонтов при условии благоприятной литологии. Выделены три главных альтернативных критерия, на которых может базироваться оценка литологических объектов и приниматься решение о целесообразности поискового бурения. Этими критериями в пределах северного борта ДДВ являются: 1) форма сейсмической аномалии – чем более она мозаична, тем больше вероятность того, что она образуется за счет остаточного / незначительного газонасыщения, или обусловлена особенностями обработки или полевой съемки; 2) площадь сейсмической аномалии (доказанные бурением сейсмические аномалии в районе северного борта ДДВ обычно имеют площадь от 1 км²); 3) соотношение сейсмической аномалии с данными по скважинам, которые были пробурены раньше (и их результаты в конкретных горизонтах) и негативными структурными аномалиями типа мини-прогибов.

Ключевые слова: AVO-исследования, инверсионные преобразования, литологические объекты, критерии оценки.

УДК 550.552.53.553

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.09>

В. Соболев,

E-mail: vasyl.sobol@dkz.gov.ua;

Державна комісія України по запасах корисних копалин,

вул. Кутузова, 18/7, оф. 816, м. Київ, 01133, Україна;

О. Карпенко, д-р геол. наук, проф.,

E-mail: karpenko.geol@gmail.com;

Київський національний університет імені Тараса Шевченка,

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

НОВА МОДЕЛЬ ПРОНИКНОСТІ ТЕРИГЕННИХ ГРАНУЛЯРНИХ КОЛЕКТОРІВ НА ПРИКЛАДІ ТУРНЕЙСЬКИХ ВІДКЛАДІВ ЯБЛУНІВСЬКОГО НАФТОГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ

(Представлено членом редакційної колегії канд. геол. наук, ст. наук співроб. І.М. Безродною)

Розглянуто наукові засади та процес створення петрофізичної моделі коефіцієнта проникності теригенних гранулярних порід-колекторів на основі даних лабораторних досліджень ядерного матеріалу з продуктивних відкладів турнею Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища ДДЗ. Описано основні види формул, які застосовуються для оцінки коефіцієнтів проникності гірських порід за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС). В основному застосовуються два теоретичні джерела, які є основою формування різних способів визначення коефіцієнта проникності за даними ГДС. Найбільш відомий з них – це формула Козені – Кармана. Другий базується на основі використання індексів гідралічних одиниць колектора HU і FZI . Описано обмеження та складнощі застосування різних відомих способів визначення коефіцієнта проникності за даними геофізичних досліджень. В основному вони пов'язані з обов'язковим використанням при розрахунках електричних характеристик гірських порід (відносний електричний опір, коефіцієнт збільшення питомого електричного опору) або розрахованого за даними електричних методів каротажу параметра (коефіцієнта залишкового водонасичення). Нова запропонована авторами модель дозволяє визначати проникність гірських порід незалежно від характеру їхнього насичення і ступеня водонасичення порового простору, що є її суттєвою перевагою. Крім того, точність оцінки проникності з використанням нової моделі помітно вище порівняно з відовими моделями (напр., моделлю Тимура). Наведено реальні приклади застосування нової моделі проникності теригенних колекторів для умов продуктивних відкладів турнею Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища.

Ключові слова: порода-колектор, геофізичні дослідження свердловин, коефіцієнт проникності, петрофізична модель, коефіцієнт пористості, коефіцієнт глинистості.

Постановка проблеми. Серед фільтраційно-ємнісних характеристик порід-колекторів нафти і газу вирішальною є фільтраційна властивість гірської породи, яка визначає можливість отримання вуглеводнів після розкриття свердловиною продуктивного пласта. Коефіцієнт пористості контролює значною мірою геологічні та добувні запаси вуглеводнів. Проте власно проникність визначає цінність відкритих покладів нафти або газу з позиції рентабельності та доцільності їхньої розробки.

Слід підкреслити важливість застосування коефіцієнта проникності ($K_{пр}$) при створенні гідродинамічних моделей покладів, оцінці потенційних дебітів пластів, визначенні граничних значень параметрів, за допомогою яких проводиться розділення порід на колектори і неколектори за даними геофізичних досліджень свердловин (ГДС). Водночас існує значна проблема достовірної оцінки величини коефіцієнта проникності порід-колекторів у свердловині. Проблема полягає в невідповідності методик визначення $K_{пр}$ з точки зору системного аналізу – різні ієрархічні рівні елементів геологічного середовища, які досліджуються різними методами, формально не можуть бути зведені до одного поняття геологічного об'єкта (зразок керна; частина пласта в присвердловинному просторі; власно продуктивний пласт або поклад). Щодо класифікації методів оцінки проникності, то їх традиційно поділяють на три групи відповідно до розмірів об'єктів досліджень і, власно, методик вимірювань. Це: 1) лабораторні вимірювання на зразках керна різного розміру; 2) методики інтерпретації даних геофізичних досліджень свердловин; 3) методики, засновані на розрахунках коефіцієнта пористості за результатами гідродинамічних досліджень пластів. Кожен із цих зазначених методів досліджень має певні позитивні сторони (переваги) порівняно з іншими і недоліки, які певною мірою впливають на зниження достовірності отриманих результатів кількісної оцінки коефіцієнта пористості. Визначення $K_{пр}$ за даними ГДС дозволяє найбільш повно та детально охарактери-

зувати розріз свердловини. Проте використання стандартних підходів і моделей не завжди забезпечує достовірність і точність оцінки коефіцієнта проникності. Власно цьому питанню – розробці більш адаптованої моделі до конкретних умов гранулярних колекторів з різним характером насичення – присвячена дана стаття.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переважна більшість моделей проникності гірських порід у випадку гранулярної пористості базується на комбінованих детерміністсько-стохастичних моделях Козені (1), або Козені – Кармана:

$$K_{пр} = \frac{K_{п.д}}{f \cdot T_e^2 \cdot S_{\phi}^2}, \quad (1)$$

де $K_{п.д}$ – коефіцієнт динамічної пористості; f – коефіцієнт форми фільтруючих каналів; T_e – гідралічна звивистість каналів; S_{ϕ} – питома поверхня порового простору (каналів) (Кобранова, 1986).

Чисельник у рівняннях петрофізичної моделі проникності всюди залишають незмінним. Унаслідок складнощів визначення на практиці динамічної пористості завжди використовують коефіцієнт відкритої або загальної пористості. У знаменнику використовують параметр, який можна визначити на практиці за даними методів ГДС, і який за фізичним змістом є аналогом гідралічної пористості, питомої поверхні порового простору або площі поверхні зерен. Як правило, використовують детерміністський підхід, де замість T_e використовують T_e – електричну звивистість порових каналів (Кобранова, 1986; Дахнов, 1985, 1982; Еникеев і Елланский, 1991). Питому поверхню порового простору (або каналів фільтрації) S_{ϕ} ототожнюють з адсорбційною властивістю поверхні твердих частинок або зерен гірської породи. Як таку властивість в основному використовують параметр – коефіцієнт залишкової водонасиченості $K_{в.з}$. Доцільність такої підміни очевидна – коефіцієнти електричної звивистості та залишкової водонасиченості гранулярних порід фігурують у відомих рівняннях питомої електропровідно-

сті або питомого електричного опору. Електрична звивистість контролює нахил лінії регресії залежно між параметром насичення P_n (коефіцієнтом збільшення опору) і коефіцієнтом водонасичення породи K_e (Кобранова, 1986; Элланский, 1978; Tobola and Holditch, 1991). На основі викладених міркувань були запропоновані найбільш вживані на сьогодні рівняння, які об'єднують коефіцієнт проникності, коефіцієнт пористості та залишкову водонасиченість гірської породи (Shahab et al., 1997; Timur, 1968; Log Interpretation..., 1968):

Формула Тимура

$$K_{np} = 0.136 \cdot \frac{\phi^{4.4}}{S_{wi}^2}, \text{ або } K_{np} = a \cdot \frac{\phi^b}{S_{wi}^c}, \quad (2)$$

де ϕ – коефіцієнт пористості; S_{wi} – коефіцієнт залишкової водонасиченості.

Значення коефіцієнтів a , b моделі Тимура (2) у роботі (Хасанов и др., 2005) суттєво змінюються залежно від результатів статистичних розрахунків за даними кернових досліджень для окремих продуктивних пластів одного з промислових районів Західного Сибіру. Це свідчить про мінливість літо-фаціальних умов формування відповідних продуктивних товщ, структури пустотного простору, типу і складу цементу в різних пластах.

В інших відомих рівняннях коефіцієнт залишкової водонасиченості виражено через питомий електричний опір породи (Tixier, 1949; Coats and Dumanoir, 1974).

У роботі (Шинкаренко, 2018) вдало наведено стислий опис основних моделей K_{np} , які мають прикладне застосування і є найбільш живими при інтерпретації даних ГДС у випадку колекторів із гранулярним і тріщинним типами пористості. Автори робіт (Хасанов и др., 2005; Шинкаренко, 2018) правильно відмічають основний недолік усіх перерахованих моделей – обмеженість конкретними геологічними умовами їхнього використання в геофізичних дослідженнях, тобто структура пустотного простору, тип і мінеральний склад цементу, відсортованість зерен є визначальними при підборі величин петрофізичних коефіцієнтів у рівняннях проникності.

У більш "свіжих" публікаціях зберігається та ж сама тенденція: використовують або коефіцієнт залишкової водонасиченості, розрахований через питомий електричний опір з відповідними апріорно підібраними коефіцієнтами (Байков и др., 2018), або знову – модель Тимура зі статистично розрахованими коефіцієнтами для окремих продуктивних горизонтів нафтових родовищ Західного Сибіру (Хасанов и др., 2005).

Петрофізичний підхід з використанням індикатора гідравлічного типу колектора FZI для підвищення достовірності й точності розрахунків коефіцієнта проникності нині стає одним з найбільш популярних при інтерпретації даних промислової геофізики у світі (Chandra, 2008; Svirsky et al., 2004; Prasad, 2003). Його реалізація потребує наявності представницької колекції кернового матеріалу. Виявлення оптимальної кількості петрофізичних або гідравлічних класів порід для звуження використання конкретних петрофізичних моделей базується на формалізованому підході із застосуванням методів математичної статистики, наприклад кластерного аналізу за способом к-середніх (Белозеров, 2010; Chandra, 2008). Проте в основу використання FZI (гідравлічного типу колектора) покладено ту ж саму модель Козені – Кармана (Хуснуллина, 2014; Белозеров, 2010; Kazemzadeh et al., 2008).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. Формулювання цілей статті. Як уже було сказано вище, практично всі петрофізичні моделі використовують модель Козені – Кармана для оцінки коефіцієнта проникності. Практичний досвід її використання довів доцільність такого підходу, незважаючи на

різноманіття літологічних, структурних, фаціальних і речовинних відмінностей існуючих порід-колекторів, які є резервуарами для рідких і газоподібних флюїдів (води, нафти та газу). Після ретельного аналізу "сильних і слабких сторін" рівнянь, заснованих на використанні значень коефіцієнта пористості й залишкової водонасиченості, причому остання як правило, виражається через електричний параметр насичення – коефіцієнт збільшення питомого опору P_n , нами було виділено такі моменти:

- петрофізичні коефіцієнти в моделі Козені – Кармана або її модифікаціях устанавлюються шляхом статистичної обробки результатів лабораторних досліджень кернового матеріалу;

- представницькі вибірки петрофізичних параметрів мають бути представлені значеннями коефіцієнтів проникності, пористості, залишкової водонасиченості (як мінімум);

- коефіцієнт залишкової водонасиченості $K_{e,z}$ визначається шляхом використання даних методів електричного опору; вважається що коефіцієнт водонасиченості K_e , розрахований через параметр P_n , має дорівнювати значенню $K_{e,z}$ за умови максимально можливого нафтогазонасичення породи-колектора.

Наведені особливості та умови використання моделі Козені – Кармана із залученням параметра насичення P_n мають свої очевидні обмеження: можуть бути використані лише за умови максимального нафтогазонасичення гірських порід. Наявність вільної води або водонасичених порід унеможливають використання даних електричних методів для розрахунку величини $K_{e,z}$. Тому авторами даної статті було зроблено спробу розробити нову модель проникності, яка б була вільна від наведених вище обмежень її застосування.

Геологічні особливості об'єкта досліджень. Як об'єкт дослідження обрано теригенні продуктивні відклади турнейського ярусу Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища ДДЗ. Породини-колектори представлені пісковиками та алевролітами переважно кварцового складу, хоч зустрічаються й аркозові різновиди (у нижній частині ярусу). Згідно аналізу наявних кернових даних пористість порід коливається від 7,0 % до 22,0 %, коефіцієнт проникності – від $0,3 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ до $4444 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Граничні значення встановлені для порід-колекторів турнейського ярусу: $K_{п.гран.} = 7,0 \%$, $K_{пр.гран.} = 0,8 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. Слід зазначити, що на Яблунівському родовищі продуктивними є відклади девону, нижнього і верхнього карбону, серпуховського і башкирського ярусів. Проте пісковики та алевроліти турнейського ярусу є основним резервуаром і головним об'єктом розробки вуглеводнів на родовищі (Головацкий и др., 1984).

Методичні прийоми та результати досліджень. Статистично доведена суттєва тіснота зв'язку між FZI і $K_{ал}$ (Белозеров, 2010) дозволяє зробити висновок, що величина глинистості породи певним чином може бути аналогом (або заміником) індикатора гідравлічного типу колектора FZI . Подібні залежності також отримані нами при вивченні відкладів турнею Яблунівського нафтогазоконденсатного родовища ДДЗ. Доцільність використання коефіцієнта глинистості при оцінці $K_{пр}$ у петрофізичних моделях замість параметра FZI також обумовлена тим, що $K_{ал}$ контролює значною мірою вміст зв'язаної води $K_{e,z}$ у теригенних породах. Не викликає сумнівів, що розподіл зв'язаної води в пустотах гірської породи певною мірою пов'язаний із ступенем відсортованості зерен, їхнім ефективним розміром, мінеральним складом цементу, зокрема глинистої складової. Усі перераховані особливості гірської породи контролюють величину проникності у випадку гранулярного (міжзернового) типу пористості.

З метою розширення ефективності використання моделі Тимура (2) або моделі Коатса (*Coats and Dumanoir, 1974*) в умовах не лише нафтогазоносних пластів з максимальним насиченням вуглеводнів, але й для водонасичених і нафто-, газо-, водонасичених пластів, були запропоновані нові вдосконалені підходи.

Відклади турнейського ярусу родовища були взяті як базові для створення та апробації вдосконаленої петрофізичної моделі проникності колекторів. Теоретичні закони розподілів було оцінено за допомогою непараметричного критерію Колмогорова – Смірнова. Як виявилось, фактичні розподіли коефіцієнтів проникності, глинистості, карбонатності та залишкової водонасиченості описуються логнормальним законом розподілу імовірностей. Коефіцієнт пористості відповідає нормальному закону розподілу імовірностей. Це було взято до уваги при створенні моделі проникності із залученням зазначених фільтраційно-ємнісних параметрів. За основу, як було вже сказано, обрано перевірену на практиці найбільш вживану модель Тимура.

Після виконаної "чистки" вибіркового даних – вилучення "ураганих" значень параметрів, із залученням усієї кернової інформації були розраховані моделі Тимура і Тимура – Коатса для пісковиків турнею за методикою Левенберга – Марквардта з відповідними апріорними коефіцієнтами. Отримано такі рівняння:

- модель Тимура:

$$K_{np} = A \cdot \frac{K_n^b}{K_{в.з.}^c}, R=0.84, \quad (3)$$

$$A = 1143,6; b = 2,935; c = 1,857;$$

- модель Тимура – Коатса:

$$K_{np} = A \cdot K_n^b \cdot \left(\frac{1-K_{в.з.}}{K_{в.з.}} \right)^c, R=0.84, \quad (4)$$

$$A = 1862,7; b = 2,929; c = 1,718.$$

Отримані моделі (3,4) можна вважати інтерпретаційними рівняннями для розрахунку коефіцієнта проникності пісковиків продуктивних відкладів турнею Яблунівського родовища. Щодо точності розрахунків, то результати таких досліджень будуть наведені нижче.

Особливістю застосування двох останніх рівнянь (3,4) є те, що коефіцієнт залишкової водонасиченості розраховують зазвичай за даними електричного каротажу. Це можливо за умови максимального нафтогазонасичення породи-колектора. В інших випадках значення коефіцієнта водонасичення, визначені за даними електрокаротажу, будуть завищені порівняно з величиною $K_{в.з.}$. Як показує досвід використання електрокаротажу, для розрахунків $K_{в.з.}$ у певних ситуаціях апріорні моделі (напр., Арчі – Дахнова) відновлюють значення водонасичення значно менше, ніж змодельовані в лабораторних умовах на зразках керна. За високих значень питомого електричного опору розраховані величини $K_{в.з.}$ можуть зменшуватись до 0,03–0,02, що для пісковиків у звичайних пластових умовах є очевидним хибним результатом. За таких значень розраховані величини коефіцієнта проникності досягають аномальних значень у десятки Дарсі, що не відповідає реальним фільтраційно-ємнісним властивостям вивчаємих відкладів і не підтверджується результатами промислового видобутку вуглеводнів. Тому було прийнято рішення розробити модель проникності гранулярних колекторів із залученням параметрів, які можна встановити за даними ГДС без використання даних методів електрокаротажу (*Karpenko et al., 2020*).

Після аналізу результатів статистичних досліджень кернових даних побудовано тримірну модель $K_{в.з.} - K_n - K_{эл}$, оптимальну з точки зору її фізичного змісту та величини багатомірного коефіцієнта кореляції (5). Коефіцієнти в рівнянні розраховувались за методикою Левенберга – Марквардта:

$$K_{в.з.} = \exp(-2.449 + 10.416 \cdot K_{г.л.} - 4.061 \cdot K_n), \quad (5)$$

$$R = 0.87.$$

Таким чином, ми можемо на основі міркувань, сформульованих також під час аналізу результатів факторного аналізу петрофізичних даних, побудованих рівнянь регресії (3–5) зробити заміни в моделях Тимура (3) і Тимура – Коатса (4). Замість $K_{в.з.}$, які зазвичай можна визначити за даними електрокаротажу через параметр насичення P_n , вводимо величини K_n і $K_{эл}$, які визначають на практиці за даними неелектричних методів – АК, НГК (ННК), ГГК-Щ, ГК. Перераховані неелектричні методи ГДС можна використовувати для оцінки пористості й глинистості порід незалежно від характеру насичення порід, з будь-яким вмістом вільної води в поровому просторі колектора. Отримаємо нову комплексну детерміністсько-статистичну модель (6):

$$K_{np} = A \frac{K_n^n}{\exp(B + C \cdot K_{г.л.} + D \cdot K_n)^m}, \quad (6)$$

$$R=0.968,$$

де $n = 3,187$; $m = 2,918$; $A = 96,232$; $B = -2,449$; $C = 10,416$; $D = -4,061$.

Нова модель (залишимо назву "Нова модель K_{np} ") за своєю структурою може бути реалізована на основі використання кернових даних на різних родовищах, де породи-колектори представлені зцементованими пісковиками та алевролітами з переважно глинистим цементом і міжгранулярним типом пористості. Ще слід зазначити, що статистичні коефіцієнти в новій моделі можуть помітно відрізнятися на різних площах, у відкладах різного віку. Обумовлено це, у першу чергу, тим, що глиниста складова в колекторах може бути представлена різними типами, мати різну адсорбційну здатність (ємність катіонного обміну); у породах різна структура порового простору, яка залежить від відсортованості мінеральних зерен, форм знаходження цементу, ступеня окатаності зерен і т. ін.

Оцінка похибки визначення коефіцієнта проникності. Виконувалося порівняння розрахованих значень K_{np} за моделями (3,6) за даними ГДС з даними лабораторних досліджень кернового матеріалу, які були прив'язані до розрізів відповідних свердловин. Дані лабораторних досліджень зразків безумовно не є представницькими в області високих значень пористості й проникності; тут існує явище дефіциту високопроникних колекторів внаслідок їхнього руйнування під час розбурювання порід та відбору керну. Проте гістограми порівнянь все одно свідчать про подібність фактичних розподілів кернових даних і K_{np} , розрахованих за новою методикою. Лише серед значень проникності, розрахованих за моделлю Тимура, зустрічаються такі, які не є типовими для колекторів даних відкладів на глибинах 5000 і більше метрів – більше 1600–2000 мД (рис. 1). Такі значення, на нашу думку, є помилковими і свідчать про недосконалість методики визначення K_{np} за даними електричних методів.

На рис. 1 наведено розподіл усереднених значень коефіцієнта проникності окремо за виділеними 44 пластами пісковиків і алевролітів по шести свердловинах у відкладах турнейського ярусу Яблунівського родовища.

Слід зазначити, що кількість визначень K_{np} на зразках керна по кожному пласту варіює в широких межах – від 2 (мінімальна прийнята кількість) до 24. Відповідно достовірність отриманих середніх значень коефіцієнта проникності суттєво залежить від кількості "точкових" замірів в одному пласті. І, незважаючи на це, збіг даних проникності за керновими даними (зелена лінія на рис. 1) і за даними K_{np} за новою моделлю (червона лінія) суттєво кращий, ніж за даними, розрахованими за формулою Тимура (синя лінія). Для порівняння точності оцінки K_{np} проаналізовано розподіли відхилень прологарифмованих значень K_{np} , розрахованих за даними ГДС (дві моделі), від значень проникності по пластах

за керновими даними. Були використані логарифми значень $K_{пр}$ тому, що, як відомо та видно з фактичних гістограм розподілів, проникність колекторів розподіляється

за законом, який теоретично описується логнормальним. Тоді розподіли різниць прологарифмованих значень $K_{пр}$ відповідають нормальному Гаусовському закону розподілу (рис. 2).

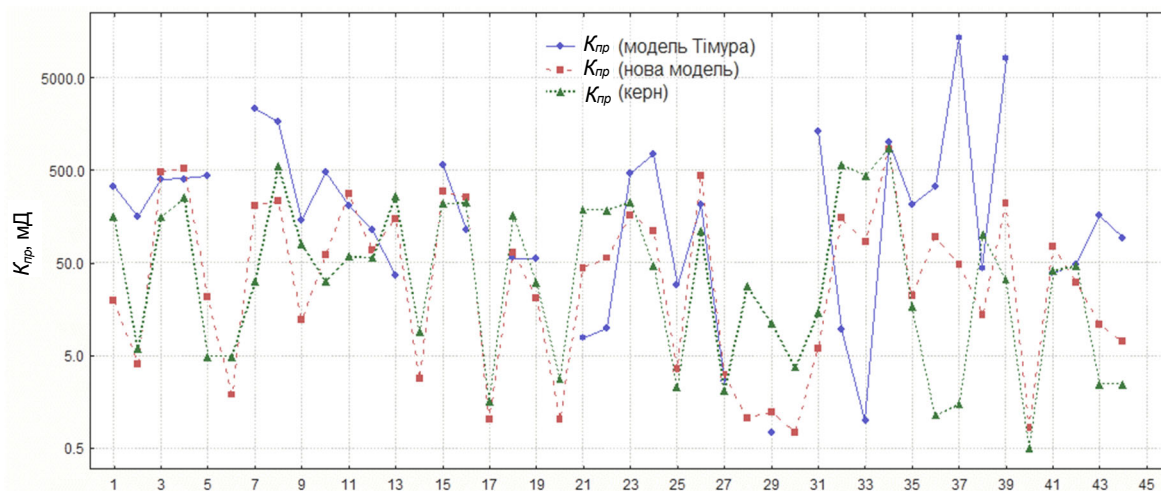


Рис. 1. Розподіл значень проникності, визначених за різними методиками по окремих пластах з інтервалів турнейського ярусу свердловин Яблунівського

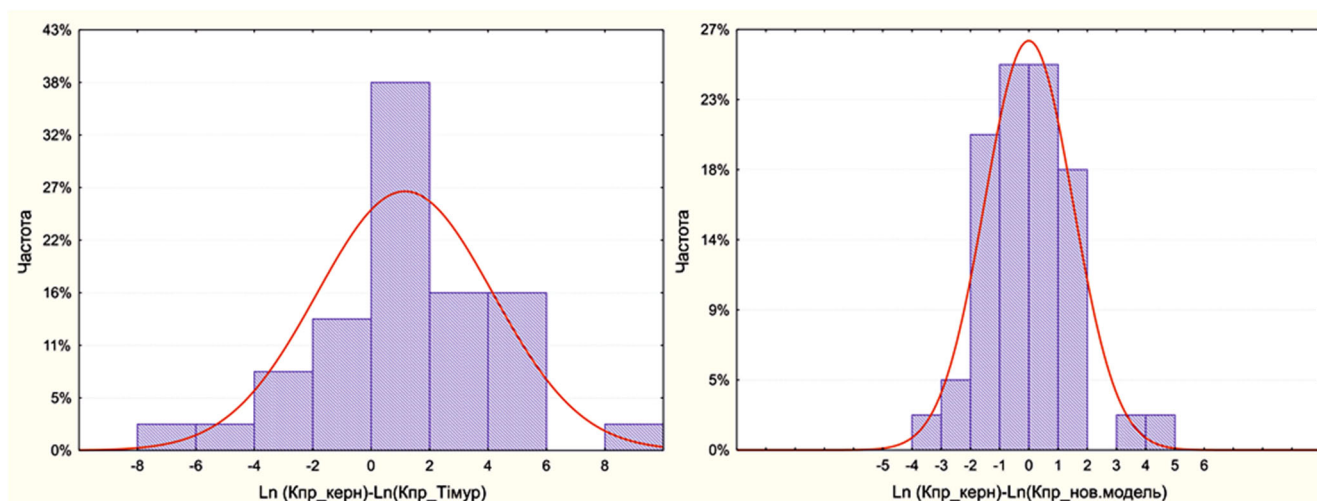


Рис. 2. Гістограми розподілів відхилень прологарифмованих значень проникності за даними ГДС від усереднених даних $K_{пр}$ за керновими даними по пластах пісковиках турнейського ярусу

За однакових розмірів шкали абсцис розподіл відхилень розрахованих значень $K_{пр}$ від кернових суттєво менше при застосуванні нової моделі порівняно з моделлю Тимура (рис. 1, 2). Це є ще одним підтвердженням значно більшої ефективності нової моделі (6) порівняно з найбільш відомою та вживаною моделлю Тимура (2, 3).

Середньоквадратичне відхилення розрахованих значень коефіцієнта проникності відносно кернових визначалося спочатку для прологарифмованих величин

$x = \ln(K_{пр})$, а потім було проведено процедуру $y = \exp(x)$ для отримання $\sigma(y)$ (табл. 1). Таким чином, установлено, що середньоквадратична похибка визначення $K_{пр}$ для нової моделі становить 4,5 мД, для моделі Тимура – значно більше – 20,1 мД. Такі значення отримано для реального діапазону коефіцієнта проникності пісковиків турнейських відкладів Яблунівського родовища.

Таблиця 1

Середньоквадратичні похибки оцінки $K_{пр}$ за двома моделями

Параметр	середнє	ср.кв.відх.	$\exp(\text{середнє})$, мД	$\exp(\text{ср.кв.відх.})$, мД
$\ln(K_{пр} \text{ керн}) - \ln(K_{пр} \text{ модель Тимура})$	1,1	3,0	3,0	20,1
$\ln(K_{пр} \text{ керн}) - \ln(K_{пр} \text{ нова модель})$	-0,05	1,5	0,95	4,5

Висновки. Використання нової інтерпретаційної моделі коефіцієнта проникності (6) порівняно із традиційною моделлю Тимура (2,3) має низку переваг. По-перше, отримано значно менше середньоквадратичне відхилення відносно кернових даних – 4,5 мД (нова модель), порівняно із 20,1 мД (модель Тимура), на прикладі піско-

виків турнею Яблунівського НГКР. По-друге, нову модель можна використовувати в поточковому режимі для оцінки $K_{пр}$ тонких пластів, де методи електрокаротажу для моделі Тимура не є ефективними. По-третє, нову модель можна використовувати для оцінки $K_{пр}$ для водонасичених або частково водонасичених колекторів, де

модель Тимура дає хибний результат. Також слід зауважити, що, як було відмічено раніше, коефіцієнт глинистості в новій моделі частково виконує роль гідралічного типу колектора *FZI*, що дозволяє стверджувати, що нова модель є більш універсальною при її використанні для оцінки проникності колекторів гранулярного типу.

Подальші дослідження в цьому напрямку слід також пов'язувати із теригенними розрізами родовищ нафти і газу, які розташовані на різних глибинах і належать до різних літофаціальних умов формування (*Рибалка та Карпенко, 2016; Вишва та ін., 2014*). Окремо слід виділити питання оцінки фільтраційно-ємнісних властивостей для нетрадиційних порід-колекторів вуглеводнів (*Михайлов та Карпенко, 2020*). У подібних відкладах з низькими колекторськими властивостями порід оцінка проникності за даними ГДС потребує високої точності. Апробація запропонованої авторами петрофізичної моделі в різних геологічних умовах дозволить зробити її більш досконалою та намітити нові підходи до визначення фільтраційних властивостей порід-колекторів за даними ГДС.

Список використаних джерел

- Байков, В.А., Жонин, А.В., Коновалова, С.И. и др. (2018). Петрофизическое моделирование сложнопостроенного терригенного коллектора. *Территория нефтегаз. Геология*, 11, 34–38.
- Белозеров, Б.В. (2010). Роль петрофизических исследований при оценке насыщения сложнопостроенных коллекторов. *Известия Томского политехнического университета*, 317, 1, 110–116.
- Вишва, С.А., Михайлов, В.А., Онищук, Д.І., Онищук, І.І. (2014). Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини). *Геологічний журнал*, 36, 1, 145–157.
- Головацкий, И., Черныш, П., Барановская, Н., Зюзьевич, Н. и др. (1984). Геологическое строение и подсчет запасов газа, нефти и конденсата Яблунковского месторождения (по состоянию на 1.07.1984 г.). Львов: УкрНИГРИ, Т. 1–4.
- Дахнов, В.Н. (1982). Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. М.: Недра.
- Дахнов, В.Н. (1985). Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород. М.: Недра.
- Еникеев, Б.Н., Элланский, М.М. (1991). Использование многомерных связей в нефтегазовой геологии. М.: Недра.
- Кобранова, В.Н. (1986). Петрофизика. Учебник для ВУЗов. М.: Недра.
- Михайлов, В., Карпенко, О. (2020). Перспективи нетрадиційної нафтогазоносності Південної приобтової зони Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(88), 53–60. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.08>
- Рибалка, С., Карпенко, О. (2016). Колекторські властивості теригенних порід на великих глибинах центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 1(72), 56–59. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>
- Хасанов, М.М., Спивак, С.И., Юлмухамедов, Д.Р. (2005). Определение проницаемости из данных геофизических исследований скважин как некорректно поставленная задача. *Разработка месторождений*, 3, 155–166.
- Хуснуллина, Г.Р. (2014). Геологическое строение и условия формирования продуктивных пластов Викуловской свиты Краснотенинского месторождения нефти (Западная Сибирь). *Дис. ... канд. геол.-минералог. наук*. ТГНУ, Тюмень.
- Шинкаренко, А. (2018). Сучасні підходи до визначення проникності порід-колекторів за даними геофізичних досліджень. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(82), 45–54.
- Элланский, М.М. (1978). Петрофизические связи и комплексная интерпретация данных промысловой геофизики. М.: Недра.
- Chandra, Tanmay (2008). Permeability estimation using flow zone indicator from Well log data. *7th International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics "Hyderabad 2008"*. Отримано з <https://www.spgindia.org/2008/140.pdf>.
- Coats, G.R., Dumanoir, J.L. (1974). A New Approach to Improved Log-Derived Permeability. *The Log Analyst*, January–February, 17.
- Karpenko, O., Myrontsov, M., Karpenko, I., Sobol, V. (2020). Detection conditions of gas-saturated layers by the result of complex interpretation of non-electrical well logging data. *Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056034>
- Kazemzadeh, E., Nabi-Bidhendi, M., Rezaee, M. R. (2008). Study of Formation Resistivity Factor by Using Hydraulic Flow Unit's Method in Carbonate Reservoir. *Journal of Science Tehran University*, 34, 1, 13–21.
- Log Interpretation. (1987). Charts Schlumberger Ltd. Houston, Texas.
- Prasad, M. (2003). Velocity-permeability Relation within Hydraulic Units. *Geophysics*, 68, 108–117.
- Shahab, M., Balan, B., Ameri, S. (1997). Permeability Determination from Well Log Data. *SPE Formation Evaluation*, September, 12(3), 170–174. DOI: 10.2118/30978-PA.
- Svirsky, D., Ryazanov, A., Pankov, M., Yukos, E. P., Patrick, W. M. C., Heriot-Watt U., Posysoev, A. and Tomsk, P.U. (2004). Hydraulic Flow Units Resolve Reservoir Description Challenges in a Siberian Oil Field. *SPE Asia Pacific Conference, Malaysia, March, 2004*, Paper SPE 87056.
- Timur, A. (1968). An Investigation of Permeability, Porosity, and Residual Water Saturation Relationship for Sandstone Reservoirs. *The Log Analyst*, July, 9 (04).
- Tixier, M.P. (1949). Evaluation of Permeability from Electric-Log Resistivity Gradients. *Oil & Gas Journal*, June, 113.
- Tobola, D.P., Holditch S.A. (1991). Determination of reservoir permeability from repeated induction logging. *SPE Formation Evaluation*, 6, 1, 20–26.
- References**
- Baikov, V.A. Zhonin, A.V., Konovalova, S.I. et al. (2018). Petrophysical modeling of a complex terrigenous reservoir. *Oil and gas territory. Geology*, 11, 34–38. [in Russian]
- Belozеров, B.V. (2010). The role of petrophysical studies in assessing the saturation of complex reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 317, 1, 110–116. [in Russian]
- Chandra, Tanmay. (2008). Permeability estimation using flow zone indicator from Well log data. *7th International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics "Hyderabad 2008"*. Retrieved from <https://www.spgindia.org/2008/140.pdf>.
- Coats, G.R., Dumanoir, J.L. (1974). A New Approach to Improved Log-Derived Permeability. *The Log Analyst*, January–February, 17.
- Dakhnov, V.N. (1982). Interpretation of the results of well logging. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Dakhnov, V.N. (1985). Geophysical methods for determining reservoir properties and oil and gas saturation of rocks. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Ellansky, M.M. (1978). Petrophysical connections and integrated interpretation of well logging data. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Enikeev, B.N., Ellansky, M.M. (1991). The use of multidimensional relationships in oil and gas geology. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Golovatsky, I., Chernysh, P., Baranovskaya, N., Zyuzkevich, N. et al. (1984). Geological structure and calculation of gas, oil and condensate reserves of the Yablunovskoye field (as of 07/01/1984). Lvov: UkrNIGRI, 1–4. [in Russian]
- Karpenko, O., Myrontsov, M., Karpenko, I., Sobol, V. (2020). Detection conditions of gas-saturated layers by the result of complex interpretation of non-electrical well logging data. *Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*, Kyiv. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056034>
- Kazemzadeh, E., Nabi-Bidhendi, M., Rezaee, M. R. (2008). Study of Formation Resistivity Factor by Using Hydraulic Flow Unit's Method in Carbonate Reservoir. *Journal of Science Tehran University*, 34, 1, 13–21.
- Khasanov, M.M., Spivak, S.I., Yulmukhamedov, D.R. (2005). Determination of permeability from well logging data as an incorrect task. *Field development*, 3, 155–166. [in Russian]
- Khusnullina, G.R. (2014). Geological structure and conditions for the formation of productive strata of the Vikulovskaya suite of the Krasnoleninskoye oil field (Western Siberia). *Thesis ... Cand. Sci. (Geol.-Min.)*. TGNU, Tyumen. [in Russian]
- Kobranova, V.N. (1986). Petrophysics. Textbook. Moscow: Nedra. [in Russian]
- Log Interpretation. (1987). Charts Schlumberger Ltd. Houston, Texas.
- Mykhailov, V., Karpenko, O. (2020). Prospects of unconventional oil and gas potential of the Southern zone of Dnieper-Donetsk Depression. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (88), 53–60. [in Ukrainian]. DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.88.08>
- Prasad, M. (2003). Velocity-permeability Relation within Hydraulic Units. *Geophysics*, 68, 108–117.
- Rybalka, S., Karpenko, O. (2016). Central part of the Dnieper-Donets Basin: Reservoir properties of deep-laid terrigenous rocks. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 1 (72), 56–59. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.72.08>
- Shahab, M., Balan, B., Ameri, S. (1997). Permeability Determination from Well Log Data. *SPE Formation Evaluation*, September, 12(3), 170–174. DOI: 10.2118/30978-PA.
- Shinkarenko, A. (2018). Modern approaches to determining the permeability of reservoir rocks according to geophysical studies. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3 (82), 45–54. [in Ukrainian]
- Svirsky, D., Ryazanov, A., Pankov, M., Yukos, E. P., Patrick, W. M. C., Heriot-Watt U., Posysoev, A. and Tomsk, P.U. (2004). Hydraulic Flow Units Resolve Reservoir Description Challenges in a Siberian Oil Field. *SPE Asia Pacific Conference, Malaysia, March, 2004*, Paper SPE 87056.
- Timur, A. (1968). An Investigation of Permeability, Porosity, and Residual Water Saturation Relationship for Sandstone Reservoirs. *The Log Analyst*, July, 9 (04).
- Tixier, M.P. (1949). Evaluation of Permeability from Electric-Log Resistivity Gradients. *Oil & Gas Journal*, June, 113.
- Tobola, D.P., Holditch S.A. (1991). Determination of reservoir permeability from repeated induction logging. *SPE Formation Evaluation*, 6, 1, 20–26.
- Vyzhva, S.A., Mykhailov, V.A., Onischuk, D.I., Onischuk, I.I. (2014). Petrophysical parameters of the types that are promising for shale gas (for the Dnieper-Donets depressions in the cross-sector). *Geophysical Journal*, 36, 1, 145–157. [in Ukrainian]

V. Sobol,
E-mail: vasyi.sobol@dkz.gov.ua;
State Commission of Ukraine on Mineral Reserves,
18/7 Kytyzov Str., office 816, Kyiv, 01133, Ukraine;
O. Karpenko, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasilkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

A NEW MODEL OF PERMEABILITY OF TERRIGENOUS GRANULAR RESERVOIRS ON THE EXAMPLE OF TURNEY DEPOSITS OF YABLUNIVSKE OIL AND GAS CONDENSATE FIELD OF THE DNIEPER-DONETS BASIN

The scientific principles and the process of creating the petrophysical model of the permeability coefficient of terrigenous granular rocks-reservoirs on the basis of laboratory researches of core material from productive deposits by the tourney of Yablunivske oil and gas condensate field of Dnieper-Donets basin are considered. The main types of formulas used to estimate the permeability coefficients of rocks according to well logging data are described. There are mainly two theoretical sources, which are the basis for the formation of different methods for determining the permeability coefficient according to the well logging. The most famous of these is the Kozeny-Karman formula. The second one is based on the use of hydraulic units of the reservoir HFU and FZI. The limitations and difficulties of application of various known methods for determining the permeability coefficient according to well logging data are described. This is mainly due to the mandatory use in the calculation of electrical characteristics of rocks (relative electrical resistivity, coefficient of increase of electrical resistivity), or the calculated parameter according to electrical logging methods (residual water saturation coefficient). The new model proposed by the authors allows determining the permeability of rocks regardless of the nature of their saturation and the degree of water saturation of the pore space, which is its significant advantage. In addition, the accuracy of permeability estimation using the new model is significantly higher compared to known models (for example, the Timur model). Real examples of application of a new model of terrigenous reservoirs permeability for conditions of productive deposits by the tourney of Yablunivske oil and gas condensate field are given.

Keywords: reservoir rock, well logging, permeability coefficient, petrophysical model, porosity, clayness.

В. Соболев,
E-mail: vasyi.sobol@dkz.gov.ua;
Государственная комиссия Украины по запасам полезных ископаемых,
ул. Кутузова, 18/7, оф. 816, г. Киев, 01133, Украина;
А. Карпенко, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: karpenko.geol@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

НОВАЯ МОДЕЛЬ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТЕРРИГЕННЫХ ГРАНУЛЯРНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ТУРНЕЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЯБЛУНОВСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

Рассмотрены научные основы и процесс создания петрофизической модели коэффициента проницаемости терригенных гранулярных пород-коллекторов на основе данных лабораторных исследований кернового материала из продуктивных отложений турне Яблунковского нефтегазоконденсатного месторождения ДДВ. Описаны основные виды формул, применяемые для оценки коэффициентов проницаемости горных пород по данным геофизических исследований скважин (ГИС). В основном используются два теоретических источника, являющиеся основой формирования различных способов определения коэффициента проницаемости по данным ГИС. Наиболее известный из них – формула Козени – Кармана. Второй базируется на основе использования индексов гидравлических единиц коллектора HFU и FZI. Описаны ограничения и сложности применения различных способов определения коэффициента проницаемости по данным геофизических исследований. В основном они связаны с обязательным использованием при расчетах электрических характеристик горных пород (относительное электрическое сопротивление, коэффициент увеличения удельного электрического сопротивления) или рассчитанного параметра по данным электрических методов каротажа (коэффициента остаточного водонасыщения). Новая предложенная авторами модель позволяет определять проницаемость горных пород независимо от характера их насыщения и степени водонасыщения порового пространства, что является ее существенным преимуществом. Кроме того, точность оценки проницаемости с использованием новой модели заметно выше по сравнению с известными моделями (напр., моделью Тимура). Приведены реальные примеры применения новой модели проницаемости терригенных коллекторов для условий продуктивных отложений турне Яблунковского нефтегазоконденсатного месторождения.

Ключевые слова: порода-коллектор, геофизические исследования скважин, коэффициент проницаемости, петрофизических модель, коэффициент пористости, коэффициент глинистости.

ГЕОЛОГИЯ РОДОВИЩ КОРИСНЫХ КОПАЛИН

УДК 550.83: 550.3: 553.495

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.10>А. Калашник, д-р геол. наук, ст. науч. сотр., проф.,
E-mail: kalashnik_anna1@ukr.net;Летная академия Национального авиационного университета,
ул. Добровольского, 5, г. Кропивницкий, 25001, Украина;А. Кузьмин, вед. геолог,
E-mail: avkuzmin@ukr.net;Казенное предприятие "Кировгеология",
ул. М. Бойчука, 8/9, г. Киев, 01103, Украина

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗМЕЩЕНИЯ УРАНОВОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДОНО-ДНЕПРОВСКОЙ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ УРАНОВОРУДНОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ В СВЯЗИ С ГЛУБИННЫМ СТРОЕНИЕМ ЛИТОСФЕРЫ

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

Целью проведенной работы является выявление основных закономерностей размещения урановорудных объектов в Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции в связи с глубинным строением литосферы.

Выполнен анализ геофизической, геологической, петрологической, радиогеохимической информации по особенностям формирования, размещения уранопоявлений различных генетических типов в Днепровско-Донецком авлакогене в тесной связи с особенностями глубинного строения литосферы, астеносферы, разломной тектоникой.

Выявлены особенности глубинного строения литосферы и их физические параметры, которые влияли на условия интенсивного рудообразования при формировании основных геолого-промышленных типов месторождений урана в районе исследований. По результатам анализа геологических материалов (ураноносность, особенности залегания осадочно-вулканогенных и, в меньшей мере, кристаллических пород, разнообразие разрывной тектоники на различных уровнях геологического разреза, условия циркуляции подземных вод и т.д.) выделены наиболее перспективные для выявления новых урановых месторождений горизонты и толщи, отнесенные к ураноносным геологическим формациям района исследований. На основании совместного анализа геологических обстановок локализации известных месторождений, рудопоявлений и проявлений урановой минерализации, выделенных геологических ураноносных формаций, их распространенности и глубины залегания последних в Днепровско-Донецком авлакогене выделены четыре наиболее перспективных для открытия в регионе исследований промышленных типа месторождений урана.

Практическое значение проведенного исследования состоит в повышении эффективности металлогенических прогнозов за счет расширения глубинных факторов и региональных критериев уранового рудообразования различных генетических типов, характерных для региона исследований. Это позволяет обоснованно определять перспективы территорий на возможность формирования промышленных рудоконцентраций урана с выделением площадей их наиболее вероятной локализации.

Ключевые слова: уран, литосфера, ураноносная геологическая формация, геолого-промышленный тип, месторождение, Доно-Днепровская потенциальная урановорудная провинция.

Общая постановка проблемы и связь с практическими заданиями. В последние годы наблюдается тенденция сокращения ежегодного прироста запасов урана по промышленным категориям на месторождениях Украины по сравнению с его добычей, что идет в разрез с принятой "Энергетичною стратегією України на період до 2030 р.". Доно-Днепровская потенциальная урановорудная металлогеническая провинция характеризуется относительно слабой изученностью на уран по сравнению с Украинским щитом, за исключением Складчатого Донбасса, хотя изученность на нефть и газ глубинным бурением в этом регионе считается одной из лучших в мире. Одновременно эта урановорудная провинция является весьма перспективной на обнаружение новых месторождений урана, учитывая насыщенность минерализованными объектами на слабо изученных территориях и наличие предпосылок выявления новых объектов уже установленных типов промышленного уранового оруденения.

Интерес к глубинному строению литосферы Днепровско-Донецкого авлакогена (ДДА), в пределах которого расположена Доно-Днепровская провинция (ДДП), прежде всего, был связан с оценкой перспектив нефтегазоносности. Получены подтверждения идей геологов-нефтяников В.Б. Порфирьева, Н.А. Кудрявцева, А.И. Тимурзиева и др., о связи большинства месторождений углеводородов ДДА с глубинными разломами (Лукин, 2009; Пашкевич и др., 2014, 2018). В пределах северного борта ДДА обнаружены промышленные скопления углеводородов глубинного происхождения в породах кристаллического фундамента,

часть их входит в контуры выделенных урановорудных районов ДДП.

Исследования закономерностей размещения урановорудных объектов Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции с учетом особенностей глубинного строения литосферы ранее не проводились. Их результаты могут в значительной степени дополнить информацию об условиях формирования уже выявленных месторождений урана и других полезных ископаемых этого региона, а также обосновать перспективы поиска новых, что повысит эффективность проведения геологоразведочных работ.

Обзор публикаций и нерешенные части проблемы. Изучению связи формирования промышленного уранового оруденения с особенностями глубинного строения литосферы до последнего времени уделялось недостаточно внимания. Особенности глубинного строения территорий урановорудных провинций чаще всего ограничивались сведениями о строении земной коры, что объясняется распространенным предубеждением, что земная кора является единственным источником этого металла при формировании урановой минерализации. В последние годы появляется все больше доказательств мантийной природы рудогенных компонентов при формировании месторождений урана различного генезиса (Абрамович, 2010; Степанюк та ін., 2012). Рассматривая мантию как основной источник рудогенных компонентов при формировании крупных рудных концентраций различной металлогенической специализации на верхних

структурных этажах земной коры, нами выявлен ряд глубинных факторов формирования крупных месторождений урана (Калашник, 2014), U-V-TR-Sc руд (Калашник, 2015) на Украинском щите (УЩ), определены закономерности формирования урановорудных метасоматитов в связи с глубинным строением литосферы УЩ (Калашник, 2016). Также нами изучены и установлены основные факторы металлогенического разнообразия и интенсивного рудообразования Волноватской металлогенической зоны, приуроченной к сочленению Донецкого складчатого сооружения и склона северо-восточной части Приазовского мегаблока УЩ и с учетом глубинного строения литосферы (Калашник и Кузьмин, 2018). На основе изучения геолого-структурных особенностей локализации экзогенно-инфильтрационных месторождений урана в Южно-Бугском, Ингуло-Ингулецком, Саксаганско-Сурском рудных районах Бугско-Днепровской металлогенической области нами установлены

основные благоприятные факторы для формирования промышленных месторождений урана экзогенно-инфильтрационного типа в Днепробасе УЩ (Калашник, 2013). Однако исследование влияния глубинного строения литосферы на формирование оруденения промышленных концентраций различных урановорудных провинций Украины, включая Доно-Днепровскую потенциальную урановорудную провинцию, заслуживает дальнейшего изучения.

В состав Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции входят следующие геотектонические подразделения Украины: Днепровско-Донецкая впадина (ДДВ), Донецкое складчатое сооружение (ДСС), юго-западный склон Воронежского кристаллического массива (ВКМ). На юге она граничит с урановорудной провинцией "Украинский щит", на западе и севере ее контур в общих чертах совпадает с государственной границей Украины (рис. 1).

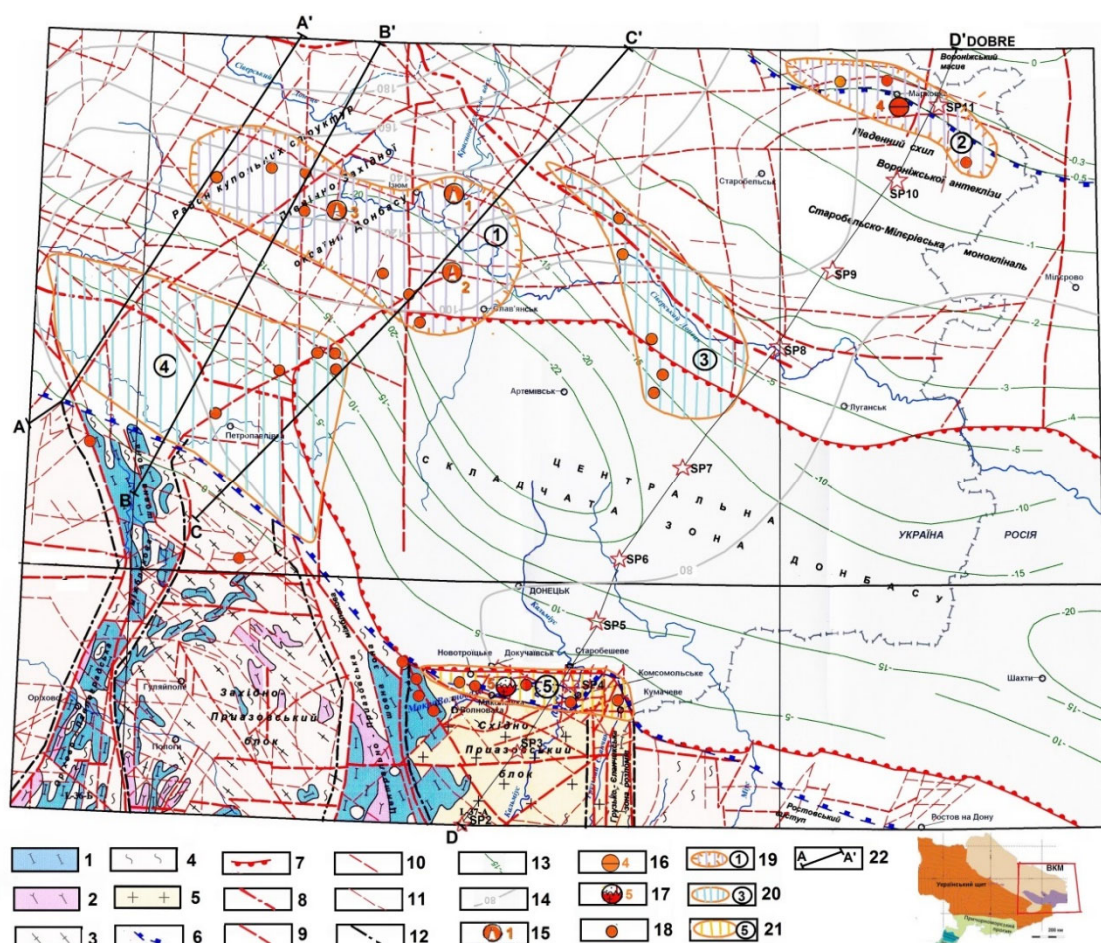


Рис. 1. Схема размещения урановорудных объектов юго-восточной части Доно-Днепровской потенциальной урановорудной металлогенической провинции:

- 1 – гнейсо-гранулитовый комплекс (центрально-приазовская серия); 2 – гнейсо-гранулитовый комплекс (западно-приазовская серия); 3 – мигматит-плагиогранитовый комплекс (восточно-приазовский комплекс); 4 – мигматит-гранитовый комплекс (западно-приазовская серия); 5 – гранитовый комплекс (западно-приазовская серия); 6 – условная граница Доно-Днепровского прогиба; 7 – краевые тектонические границы складчатого Донбасса; 8 – краевые разломы грабена Днепрвско-Донецкой впадины; 9 – глубинные мантийные разломы первого ранга; 10 – мантийные и коровые разломы второго ранга; 11 – разломы третьего ранга; 12 – границы шовных межблоковых зон; 13 – изогипсы кристаллического фундамента ДДВ, в км; 14 – глубина залегания (км) подошвы сейсмической литосферы в ДДВ (по данным (Старостенко и др., 2017а)); 15 – месторождения урана уран-битумного типа в отложениях нижнего триаса (1 – Краснооскольское, 2 – Адамовское, 3 – Берекское); 16 – Марковское месторождение урана осадочно-диагенетического типа в угленосных и содержащих обугленную органику толщах карбона; 17 – Николаевское месторождение урана гидротермального типа в минерализованных зонах дробления терригенных и карбонатных толщ; 18 – рудопроявления урана различного генетического типа; 19 – урановорудные районы (в породах мезозоя): 1) – Славянский (Т₁) (Полтавская металлогеническая область), 2) – Марковский (Т₂) (Троицко-Стрельцовская металлогеническая зона), 20 – потенциальные урановорудные районы (в породах палеозоя): 3) – Лисичанский (С₂₋₃) (Донецкая металлогеническая область), 4) – отдельный Павлоградский (С₁); 21 – Волноватская металлогеническая зона (D₃) (зона сочленения Донбасса с северо-восточной частью Приазовского мегаблока УЩ); 22 – линии разрезов

В Доно-Днепровской потенциальной металлогенической провинции выделены крупные по размерам (тысячи и первые десятки тысяч квадратных километров) Лохвицкая, Полтавская и Донецкая металлогенические области, Троицко-Стрельцовская металлогеническая зона, а в их пределах более мелкие подразделения: Славянский и Марковский урановорудные, Лисичанский и Павлоградский потенциально урановорудные районы (рис. 1), Черниговская рудоперспективная территория. Из других полезных ископаемых для Доно-Днепровской провинции характерны каменный уголь, газ и нефть. Кроме них, здесь разведаны и открыты месторождения ртути, фосфоритов, бурых углей, флюорита, каменной соли, строительных материалов, а также выявлены крупные рудопроявления полиметаллов. ДДП отличается слабой специализированной изученностью на уран, однако в ее пределах установлены в разной мере проявленные предпосылки для выявления промышленного уранового оруденения нескольких генетических типов.

По современным представлениям Днепровско-Донецкая впадина представляет собой палеорифт. В прибрежных частях ДДВ осадочно-вулканогенные породы залегают на древнем кристаллическом фундаменте. В

центральном грабене мощность осадочно-вулканогенных отложений достигает 12–15 км, но однозначно не установлено на чем они залегают. В целом, ДДВ представляет собой симметричную структуру, в тоже время Донбасс характеризуется явной асимметрией относительно Центральнодонецкого разлома. Глубина до фундамента постепенно увеличивается в восточном направлении и приобретает максимальное значение в 21 км в районе профиля DOBRE (Пашкевич и др., 2018). Под осадочной толщей ДДВ и Донбасса наблюдается уменьшение мощности консолидированной коры почти в два раза, чем в пределах УЩ и ВКМ с минимальным ее значением 17 км в осевой части Донбасса. Ее утонение происходило в период девонского рифтогенеза (Старостенко и др., 2017, а). Кристаллическая кора по значению скорости и плотности пород разделена на верхнюю, среднюю, нижнюю (Корчин и др., 2013). Консолидированная кора Донбасса также как и перекрывающая осадочная толща является ассиметричной. Кроме асимметрии, для нее отмечается наличие высокоскоростного линзовидного пласта, который залегают на поверхности Мохо (рис. 2).

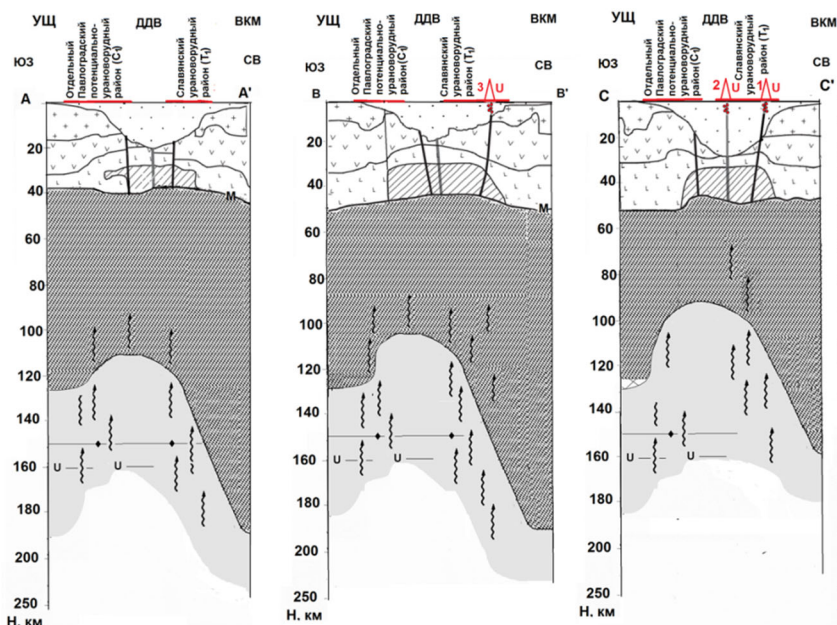


Рис. 2. Генерализованные разрезы земной коры и литосферы вкост ДДВ вдоль профилей А-А', В-В', С-С' (положение профилей на рис. 1) с использованием материалов (Пашкевич и др., 2018; Старостенко и др., 2017, а, б):

- слои земной коры: 1 – осадочный; 2 – "гранитный"; 3 – "диоритовый"; 4 – "базальтовый"; 5 – коромантийная смесь; 6 – положение раздела Мохо; 7 – краевые разломы осевой части рифта; 8 – ось рифта; 9 – граница стабильности графит-алмаз; 10 – уровень формирования очаговых потоков ураноносных транслитосферных флюидов; 11 – граница литосфера-астеносфера; 12 – астеносфера; 13 – железистые ультрабазиты (железистые дуниты, ильменит-флогопит-гранат-оливиновые породы; 14 – амфиболовые и пироксеновые глиммериты, шпинель-гранатовые, гранатовые лерцолиты; 15 – хромшпинелевые гарцбургит-лерцолитовая и дунит-перидотитовая серии с реликтами деформированных структур, гранатовые лерцолиты с реликтами деформированных структур; 16 – проекции контуров урановорудных районов на дневную поверхность; 17 – астеносферные флюидопотоки; 18 – зоны уранового оруденения в приразломных зонах; 19 – месторождения урана уран-битумного типа в отложениях нижнего триаса (1 – Краснооскольское, 2 – Адамовское, 3 – Берекское)

В западной части ДДВ по сейсмическим данным линзовидный пласт не фиксируется. Рельеф границы М северного и южного бортов ДДВ резко отличается. Мощность земной коры на бортах ДДВ колеблется от 40 до 48 км. Однако поверхность М в ДДВ имеет более простое строение, чем в Донбассе, где она осложнена линзовидным коровым пластом, которая рядом исследователей (Старостенко и др., 2017, а; Стовба и Стивенсон, 2000) рассматривается как коровый пласт, утяжеленный за счет мантийных составляющих в период пермского орогенеза, который практически не затронул

ДДВ, но уплотнил осадочную толщу в Донбассе (Пашкевич и др., 2014; Старостенко и др., 2017, б). В Донбассе глубина залегания подошвы коры приближается к 50 км, при этом прогиб раздела М не согласован с авлакогеном (Пашкевич и др., 2018), что, по мнению ряда исследователей (Пашкевич и др., 2018; Старостенко и др., 2017, а), свидетельствует о более активных преобразованиях коры северного борта ДДВ, чем южного борта, где УЩ был упором при растяжении коры в процессе формирования рифта.

История ДДВ начинается с позднпротерозойского рифтинга и в докембрии она претерпела тафтогенез,

инверсионное валообразование, стадию пострифтогенной синеклизы, возможно стадию инверсионного тектогенеза. В палеозойско-мезозойский магэстап произошла реактивация рифейских рифтогенов, которая имела скрытый характер на фоне обширного синеклизного прогиба. В ДДВ эта предрифтовая стадия началась в среднем частично в верхнем девоне. С начальным горстообразованием связан оливиново-базальтоидный трапповый вулканизм, сменяемый щелочно-базальтоидным. Широко развиты шельфовые известняки. В каменноугольный период происходят новые обширные прогибания, с осцилляционным режимом осадконакопления, с частыми изменениями климата от гумидного до аридного. Это обусловило заполнение прогиба карбонатно-терригенными угленосными отложениями. Интересен факт присутствия в наиболее выдержанных угольных пластах, которые образовались в переломные моменты (смена сжатий и растяжений) повышенного количества пирокластического материала – тонштейна. Также присутствуют в угольных пластах примеси пеплов, соответствующих по составу средним и кислым эффузивам. Это свидетельствует о проявлении в течение каменноугольного периода среднего и кислого магматизма. В предмеловое время в части синеклизы, соответствующей Складчатому Донбассу, образовалась миогеосинклинальная область (Донецкий кряж) (Лукин, 2009).

В пределах Днепровского грабена, как и в пределах Донецкого складчатого сооружения, наблюдается резкое утонение земной коры по сравнению с УЩ и Воронежским массивом и значительный подъем верхней мантии. В связи с наличием глубинных разломов, достигающих верхней мантии, эта территория, по мнению В.А. Шумлянского, является зоной высокой проницаемости для мантийных и коровых флюидов (Шумлянский, 1981). Складчатый Донбасс отделен от Миллеровской моноклинали, расположенной на склоне Воронежского массива, Придонецкой зоной шириной до 20 км, ограниченной с внешней стороны Краматорским сбросом. Главная складчатость Донбасса и поперечные структуры являются отражением глубинных разломов, зарождение и становление которых связано с поздним протерозоем, средним–поздним девонем. Тектоно-магматическая активизация связана со складчатостью и воздыманием Донбасса и отчленением от Днепровского грабена в конце карбона–перми. Тектоническая активизация в раннем мелу перед обширной меловой трансгрессией и в конце мела–палеоцена обусловлена общим сжатием Донецкого прогиба (Шумлянский, 1981). Результатом последней явилось подновление древних надвигов, завершение формирования всех типов складчатости и формирование наложенных депрессий в зонах глубинных разломов.

В пределах ДДА широко проявлена разломная тектоника. Выделяется ряд субширотных разломов – Краматорский, Петровско-Кременской, Артемовский, Горловский, Байракский и др. Краматорский разлом разделяет области распространения соленосной и терригенно-вулканогенной формации девона, ограничивая с севера площадь, на которой развиты каменноугольные отложения максимальной мощности. Он отделяет также Днепровско-Донецкую впадину от инверсионного блока Донецкого складчатого сооружения. Из субмеридиональных глубинных разломов уверенно прослеживается только Криворожско-Кременчугский, который пересекает весь авлакоген и фиксируется возле г. Сумы.

В 1976–1990 гг. В.А. Шумлянский и др. на основе историко-геологического анализа развития главных тектонических структур и условий уранового рудообразования в пределах Днепровско-Донецкого авлакогена ранее

указали на наличие следующих установленных и предполагаемых эпох уранового рудообразования (Шумлянский и др., 1995): 1) девонскую (D_{1-2}) с полигенным оруденением (гидротермально-осадочным) в терригенной формации северо-восточного склона УЩ; 2) каменноугольную (C_{1-3}) с диагенетическим оруденением в карбонатно-терригенном угленосном комплексе юго-восточной части ДДВ; 3) раннепермскую (P_1) с экзодиагенетическим оруденением в пестроцветной терригенной формации в Бахмутской и Кальмиус-Торецкой котловинах; 4) пермотриасовую (P_2-T_1 – предполагаемая) с эпигенетическим оруденением в галогенно-карбонатном и терригенно-угленосном комплексах северо-восточного борта ДДВ; 5) позднетриасовую-раннеюрскую с эпигенетическим (уранобитумным) оруденением в разнотипных формациях (D, C, P, T_{1-2}) в связи с зонами разломов; 6) позднейскую (J_3-K_1 – предполагаемая) с экзодиагенетическим оруденением в фосфоритах на всей территории впадины; 7) неоген-четвертичную ($N-Q$) с эпигенетическим оруденением грунтовой окислительной зональности в терригенно-глауконитовом угленосном комплексе ДДВ.

Выведенные по состоянию на текущий момент урановорудные объекты ДДА встречаются в кристаллических породах архея и протерозоя, коре выветривания этих пород, а также в осадочных и осадочно-вулканогенных породах верхнего палеозоя, осадках мезозоя и кайнозоя. Урановорудные объекты (месторождения, рудопроявления, проявления урановой минерализации и радиоактивные аномалии) этого региона были разбраны согласно принятой в КП "Кировгеология" методике, которая сводилась к определению природы радиоактивности и отнесению к определенному генетическому типу. Также были использованы результаты гидролитохимического картирования и детальные специализированные работы последних лет по Днепровско-Донецкой впадине, выполненные КП "Кировгеология". Новые данные по геологическому строению и урановому оруденению, полученные за последние годы, позволяют по новому выполнить выделение основных ураноносных формаций региона исследований по всему геологическому разрезу, включая древние породы архея и протерозоя, что является одной из нерешенных частей проблемы изучения пространственно-временных закономерностей формирования и размещения урановорудных объектов в ДДП.

Общая характеристика особенностей глубинного строения ДДА по данным ГСЗ, сейсмотомографии, 3D магнитного и гравитационного моделирования на основе многолетних исследований представлена в ряде работ (Соллогуб, 1986; Ильченко, 1992; Корчин и др., 2013; Пашкевич и др., 2014, 2018; Старостенко и др., 2017, а, б), по данным магнитотеллурического и аудиомангнитотеллурического зондирования – представлена в работе (Шеремет и др., 2017). Это позволило выполнить комплексный анализ неоднородностей различных этажей литосферы этого региона (Пашкевич и др., 2018), на основании чего выделен ряд перспективных участков для поисков промышленных скоплений углеводородов. На данном этапе исследований нерешенной частью проблемы является выявление закономерностей формирования и размещения месторождений урана в Доно-Днепровской потенциальной урановорудной металлогенической провинции с учетом особенностей глубинного строения литосферы. Подобные исследования ранее не проводились, однако выявление таких закономерностей может стать научной основой, позволяющей определить предпосылки обнаружения богатых урановых рудоконцентраций различных генетических типов.

Изложение основного материала. В Днепровско-Донецком авлакогене породы отличаются значительной насыщенностью радиоактивными объектами. Урановые объекты различного ранга, начиная от месторождений, крупных рудопроявлений, проявлений и до радиоактивных аномалий, встречены в кристаллических породах архея, протерозоя, коре выветривания по этим породам, в осадочно-вулканогенных образованиях рифея и венда, в осадочной и частично в осадочно-вулканогенной толще верхнего палеозоя (девон, карбон и пермь), осадках мезозоя (триас, юра и мел) и кайнозоя (палеоген, неоген, антропоген). На сегодняшний день при проведении поисковых, съемочных и разведочных работ в ДДА выявлено и в различной степени оценено пять месторождений, 26 рудопроявлений, 48 проявлений урановой минерализации и 1350 радиоактивных аномалий.

Все выявленные в пределах ДДА урановые объекты относятся к двум основным генетическим классам: эндогенному и экзогенному. К эндогенным концентрациям урана отнесены: магматические в интрузивных массивах сиенитов, гранитов, карбонатитов; пегматитовые; гидротермальные в минерализованных зонах дробления пород кристаллического фундамента вне связи с вулканогенно-интрузивными образованиями; гидротермальные в зонах дробления осадочных пород. К экзогенным скоплениям урана отнесены: осадочно-диагенетические в фосфоритах и в фосфоритосодержащих породах, в угленосных толщах; осадочные в битуминозных известняках; эпигенетические инфильтрационные в пестроцветных проницаемых осадках в зонах окисления-восстановления.

Анализ имеющихся геологических материалов (ураноносность, особенности залегания осадочно-вулканогенных и, в меньшей мере, кристаллических пород, разнообразие разрывной тектоники на различных уровнях геологического разреза, условия циркуляции подземных вод и т.д.) позволил нам выделить наиболее перспективные на выявление урановых месторождений горизонты и толщи, отнесенные нами к ураноносным геологическим формациям в пределах Доно-Днепровской ураноносной металлогенической провинции (от более древних к молодым): 1) кристаллические породы (AR-PR) основания впадины с присущим для них урановым оруденением; 2) верхнепротерозойская (рифей-вендская – PR₃) с предполагаемым оруденением в эффузивах и вмещающих их толщах; 3) верхнедевонская (D₃) с гидротермальным оруденением в терригенной толще; 4) каменноугольная (C₁₋₃) с осадочно-диагенетическим и эпигенетическим инфильтрационным оруденением в угленосных осадочных породах; 5) нижнетриасовая (T₁) с гидротермальным оруденением в различных по составу осадках, содержащих окисленные твердые битумы, в связи с тектоническими зонами; 6) мел-палеогеновая (K-P) с осадочно-диагенетическим оруденением в фосфоритах терригенно-глауконитовой толщи и эпигенетическим инфильтрационным оруденением в содержащих обугленную органику в проницаемых осадках; 7) кайнозойская (палеоген-неогеновая) с эпигенетическим оруденением грунтовой окислительной зональности бурого угленосного комплекса.

В формации кристаллических пород и кор выветривания встречены признаки уранового оруденения самых различных генетических типов. Однако доступны для опознания лишь узкие полосы этих пород вдоль склонов Украинского щита и ВКМ. Значительных рудопроявлений здесь не встречено. Учитывая весьма слабую изученность и громадные глубины залегания кристаллических пород на большей части описываемого

региона, эту формацию мы относим к малоизученным с ограниченными перспективами.

Предполагаемая верхнепротерозойская формация, выделенная здесь В.А. Шумлянским и др. (*Шумлянский, 1981; Шумлянский и др., 1995*) по косвенным геологическим данным: по наличию эффузивов, вулканического пепла и жерловой фации древних вулканов, может быть отнесена только к категории, представляющей интерес для последующего накопления данных в процессе проведения массовых поисков.

В породах верхнедевонской формации открыты объекты с промышленными параметрами (Николаевское месторождение, ряд перспективных рудопроявлений), которые приурочены к зонам глубинных разломов и узлов их пересечения в пределах Волновахской металлогенической зоны. Урановая минерализация Николаевского месторождения урана представлена настураном и в меньшей мере урановыми чернями, а также сорбцией на окислах и гидроокислах железа, марганца, гидрослюдах, монтмориллоните и углестом веществе. Ториевые минералы представлены ураноторитом, ферриторитом и монацитом. Породы, вмещающие оруденение, катаклазированы, поддроблены, брекчированы, милонитизированы, изменены наложенными процессами окварцевания, карбонатизации, хлоритизации, серицитизации, аргиллитизации, баритизации, гематитизации, альбитизации и пиритизации. Урановое оруденение относится к гидротермальному типу в минерализованных зонах дробления терригенных и карбонатных толщ. Возраст уранового оруденения Николаевского месторождения составляет 340 ± 60 млн лет (по величине $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$) и соответствует времени внедрения кимберлитовых трубок и субвулканических щелочных пород покровно-киреевского комплекса. Металлогенический облик Волновахской металлогенической зоны сочленения северо-восточной части Приазовского мегаблока УЩ и Донецкой складчатой структуры в связи с особенностями глубинного строения литосферы охарактеризован нами в работе (*Калашник и Кузьмин, 2018*). Исходя из связи мощности литосферы и металлогенической специализации в зоне сочленения Приазовского мегаблока и ДСС, отсутствуют условия для формирования крупных рудоконцентраций урана, однако имеются предпосылки для формирования значительных концентраций титана, меди, ванадия, бериллия, олова, марганца, TR, ниобия и масштабных скоплений флюоритовых руд (*Калашник и Кузьмин, 2018*). Кроме того, в связи с тем, что отложения девона в регионе залегают на значительных глубинах (800 м и более), за исключением горстового поднятия этих пород на границе Складчатого Донбасса с Приазовским мегаблоком УЩ (Волновахская металлогеническая зона), перспективы открытия новых месторождений урана в этих отложениях за пределами указанной металлогенической зоны крайне ограничены.

Каменноугольная формация с осадочно-диагенетическим и эпигенетическим инфильтрационным оруденением в угленосных породах характеризуется большой насыщенностью радиоактивными объектами. Подавляющее большинство открытых в регионе уранопоявлений приурочены к угленосным и углесодержащим осадкам карбона. Особенно насыщены ими породы Донецкого складчатого сооружения, Самаро-Торецкого поднятия и Старобельско-Миллеровской моноклинали. Руды с промышленными параметрами установлены на Марковском месторождении урана и целом ряде рудопроявлений. Урановая минерализация в углях представлена настураном и урановой чернью. Часть урана

находится в тонкодисперсной минералогической недиагностируемой форме. Урановое оруденение в углях сопровождается повышенным содержанием ванадия, хрома, свинца, цинка, меди, кроме того, встречено свинцово-цинковое оруденение прожилкового типа. Средний возраст уранового оруденения Марковского месторождения составляет 200 ± 30 млн лет (*Шумлянский и др., 1995*), наложенной полиметаллической гидротермальной минерализации – 200 млн лет (*Шумлянский и др., 1995*). Урановые руды отнесены к осадочно-диагенетическому типу в угленосных и содержащих обугленную органику толщах карбона. В позднекиммерийское время 200 млн лет назад оруденение переработано, возможно с дополнительным привнесом урана с гидротермальными растворами.

Для карбоновой ураноносной углесодержащей формации характерны также концентрации урана гидротермального происхождения, локализованные в минерализованных зонах разломов среди песчаников, алевролитов, песчано-глинистых сланцев; в районах северо-западного замыкания линейных антиклиналей Донбасса и на их границах с Бахмутской и Кальмиус-Торецкой котловинами; в Волновашской металлогенической зоне.

Оруденение гидротермального типа карбоновой ураноносной углесодержащей формации, как и в пределах нижнетриасовой пестроцветной ураноносной формации, для части уранопоявлений отличается присутствием ураноносных битумов. Однако значительная часть уранопоявлений ураноносных битумов не содержат, а их рудная минерализация представлена настураном. Изотопный возраст урановых руд, представленных настураном, для трех рудопоявлений составляет: для Сватовского – 220 млн лет, для Артемовского – 200 млн лет, для Горского глубокого – 110 млн лет (*Шумлянский и др., 1995*). Это подтверждает эпигенетическую, по отношению к вмещающим породам, природу оруденения и указывает на его преимущественную связь с киммерийской тектоно-термальной активизацией. Учитывая все это, карбоновая углесодержащая геологическая формация оценивается нами как одна из наиболее перспективных ураноносных формаций ДДП, особенно в районе сочленения Днепровско-Донецкой впадины с Донецкой складчатой областью, а также в южной и северной периферии последней у границ с Украинским щитом и Воронежским кристаллическим массивом.

Наиболее перспективной в описываемом регионе является нижнетриасовая формация с уран-битумным оруденением. Урановые объекты с промышленными концентрациями данного типа оруденения выявлены в центральной части ДДВ и в зоне сочленения последней с Донецкой складчатой областью на глубинах от 200–500 м до 2000 м. Основное оруденение приурочено к песчаникам, реже – алевролитам и глинам дроновской свиты нижнего триаса (Адамовское, Краснооскольское и Берекское месторождения). Рудными телами являются скопления ураноносного битума (керита, антроксолита) в песчаниках и алевролитах в виде рассеянных включений в цементе или густой пропитки породы. Кроме того, отмечаются выделения урана в виде собственно урановых минералов (настурана, коффинита, урановых черней). Фиксируется на этих объектах и сорбция урана глинистым веществом, наличие окислов урана в сростках с пиритом. В урановых рудах отмечаются повышенные концентрации молибдена, скандия, свинца, цинка, бария, ванадия. В породах, вмещающих урановое оруденение, отмечается повышенная трещиноватость, интенсивное дробление, брекчирование, а также наложенные процессы в виде обеления (аргиллитизация?), карбонатизация, окварцевание, гематитизация, пиритизация. Ряд исследователей (*Шумлянский и др., 1995*) указывают на

наличие в пределах уранопоявлений данного типа вертикальной зональности. В частности, урановое оруденение на Адамовском и Краснооскольском месторождениях размещено на верхних горизонтах месторождений (носит вкрапленный, прожилковый или гнездообразный характер), тогда как ртутно-полиметаллическое – на более значительных глубинах. При этом характерной особенностью является то, что урановая, полиметаллическая, ртутная, флюоритовая и другие виды минерализации локализованы только в пределах гидротермально аргиллизированных пород, площадь которых, как указывают эти специалисты, в 10 раз превышает площадь оруденения. Единого мнения о возрасте уран-битумного оруденения нет. Различными методами определено три различных возраста: 107–160 млн лет (средний 140 млн лет) (по величине $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$), 170–206 млн лет (средний 195 ± 5 млн лет), 136–254 млн лет (средний 220 ± 10 млн лет) (*Шумлянский и др., 1995*). По геологическим данным наиболее уверенное время рудообразования отвечает нижнему триасу (в дроновской свите до отложения серебрянской свиты), менее уверенное – верхнему триасу (до отложения протопивской свиты). Радиологические данные позволяют отнести оруденение к раннему триасу – поздней юре (*Шумлянский и др., 1995*). В целом этот тип оруденения в ДДП имеет много общего с промышленными месторождениями района Амброзия Лейк Трансильванской впадины, образование которых связано с киммерийской фазой диастрофизма.

С мел-палеогеновой геологической формацией в основном связано комплексное уран-фосфорное оруденение осадочно-диагенетического типа в терригенно-глауконитовой толще на всей территории ДДП. Однако из-за убогого содержания можно говорить лишь о возможности попутного извлечения урана при отработке фосфорных руд.

Определенные перспективы мы связываем с кайнозойской (палеоген-неогеновой) формацией. Инфильтрационное урановое оруденение приурочено к угленосным отложениям берекской и полтавской свит и локализовано на относительно небольшой глубине от поверхности. Учитывая значительную площадь распространения угленосных кайнозойских отложений в пределах впадины и очень слабую изученность данного типа оруденения этого типа, можно ожидать выявления в этом регионе достаточно крупных скоплений руд, пригодных для отработки методом подземного выщелачивания.

В процессе проведения исследований нами была установлена определенная зависимость формирования объектов уранового оруденения различного генетического типа Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции от ряда факторов, связанных с особенностями глубинного строения литосферы, разломной тектоникой, проявлениями мантийного магматизма. При этом мы основывались на представлении, что приповерхностное строение коры, ее состав, геологические особенности, геодинамика, магматизм есть следствие глубинных процессов (*Соллогуб, 1986*).

На представленных разрезах литосферы, секущих ДДА в различных частях, видна неоднотипность, дифференциация мощности земной коры отдельных областей ДДА (рис. 2). Связь уранового оруденения в регионе с особенностями строения земной коры крайне неравнозначная.

На стыке северо-восточной части Приазовского мегаблока УЩ с Донбассом проявлен щелочно-базальтоидный мантийный магматизм, характеризующийся повышенной основностью, титанистостью и щелочностью. Он приурочен к Волновашской металлогенической зоне, протягивающейся в широтном направлении на

80 км от с. Новотроицкое до с. Покрово-Киреевское (Нечаев, 1970; Калашиник и Кузьмин, 2018). Вулканиды принадлежат к щелочно-ультраосновной и щелочно-ультрабазальтоидной формациям. Геологический возраст соответствует среднему девону. Отмечаются четыре магматические фазы. В Волновахской зоне разломов вскрыто шесть кимберлитопоявлений – Петровское, Петровское восточное, Горняцкое, трубка "Надия", трубка "Южная", трубка "Новолашинская". Исследованные нами мантийные ксенокриты из девонских кимберлитовых трубок Новолашинская, Южная, Петровская Волновахской металлогенической зоны дают низкотемпературную геотерму по гранатовой мономинеральной термобарометрии (рис. 3) (Ashchepkov et al., 2020).

Мантийная литосфера в районе Волновахской металлогенической зоны резко разделена на уровне 4,2 ГПа, судя по присутствию эклогитовой линзы и хромитов на этом уровне и изменению тренда для ильменитов с образованием Crx-Ilm-Phl жил в верхней части (рис. 3). Выделено 7 слоев (рис. 3): слой I – 2,5–1 ГПа обогащен Gar-пироксенитами и Sp-перидотитами ($Fe\#Ol \sim 0,11-0,14$); слой II – 2,5–3,2 ГПа – Gar-Sp перидотиты ($Fe\#Ol \sim 0,08-0,10$); слой III – 4,3–3,2 ГПа разнообразные перидотиты ($Fe\# \sim 0,07-0,095$); слой IV содержит пироксенитовые пиропы с наивысшим La, эклогиты и перидотиты с реакционными Crx ($Fe\#Ol \sim 0,10-0,125$); слой V – 5,8–5 ГПа – гарцбургиты субкальциевые, высокохромистые хромиты и Mg-ильмениты; слой VI – 5,8–6,8 ГПа содержит обогащенные Fe пиропы типа деформированных перидотитов, Mg-эклогиты и Cr-Mg ильмениты; слой

VII – это более 6.8 ГПа, представлен реакционными высокотемпературными перидотитами, судя по железистым гранатам. Пиропы обогащаются LREE, LILE и Hf, Zr при понижении давления от 6 до 3 ГПа. Примитивные гранаты в нижней части литосферной мантии имеют округлые спектры REE, TRE; субкальциевые пиропы имеют REE спектры S-типа с перегибом на Nd. Перидотитовые клинопироксены имеют наклонные линейные спектры REE со снижением от Pr к La и высокими уровнями LILE и HFSE. Обогащенная Fe пироксенитовая группа с колоколообразными неправильными спектрами и LILE близкими к уровням LREE, вероятно, образовалась при реакции с Fe-богатыми эклогитами. Возможной причиной HFSE и LILE обогащения верхней части субкратонной литосферной мантии (СКЛМ) является субдукция фрагментов континентальной коры или осадков в раннем-среднем архее с образованием метасоматитов Amph-Phl типа. В дальнейшем преимущественно океаническая субдукция сопровождалась гибридным метасоматизмом в нижней части активированным плюмом 1,8 Ga, который сгенерировал сфокусированный поток расплава с переплавлением слюдисто-амфиболовых метасоматитов и непрерывным обогащением TRE и LILE в интервале от 6 до 3 ГПа. В палеозойское время мантийные геотермы ближе к 38–40 МВт/м², а континентальная субдукция сопровождалась ультракалийным вулканизмом. В позднедевонский период кимберлитовый магматизм сопровождался плюмовыми щелочными пикритами (Ashchepkov et al., 2020).

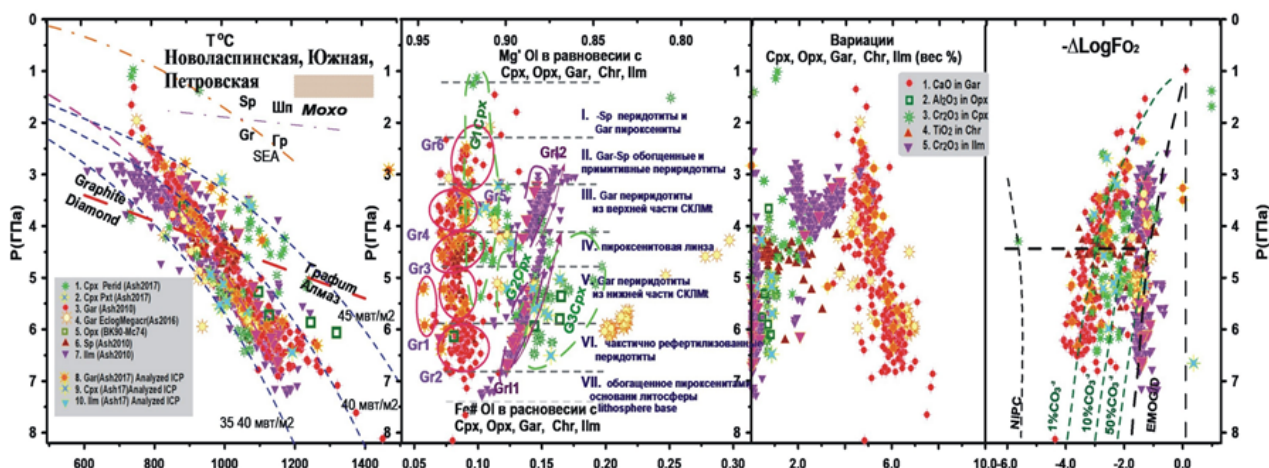


Рис. 3. Диаграмма $PTXFO_2$ для минералов из концентратов, демонстрирующая строение мантии и слоистость субкратонной литосферной мантии под Волновахской металлогенической зоной (зона сочленения северо-восточной части Приазовского мегаблока УЩ с Донбассом (для ксенокритов из кимберлитов трубок Новолашинская, Южная, Петровская) (Ashchepkov et al., 2020).

Условные обозначения: 1. Клинопироксены: $T^\circ C - P$ (ГПа) (Ashchepkov et al, 2017, a);

2. То же самое для безхромистых клинопироксенов; 3. Гранаты: $T^\circ C$ (O'Neil and Wood, 1979) – P (ГПа) (Ashchepkov et al, 2017);

4. Гранаты из эклогитов (Ashchepkov et al., 2010, 2017, a); 5. Ортопироксены: $T^\circ C - P$ (ГПа) (McGregor, 1974);

6. Хромиты: $T^\circ C$ (O'Neil and Wood, 1979) – P (ГПа) (Ashchepkov et al, 2010); 7. Ильмениты: $T^\circ C$ (Taylor et al., 1998) – P (ГПа)

(Ashchepkov et al., 2010); 8. Гранаты, проанализированные ICP-MS; 9. Клинопироксены, проанализированные LA ICP-MS4;

10. Ильмениты, проанализированные ICP-MS

Рудопоявления урана и Николаевское месторождение, связанные с Волновахской металлогенической зоной, зоны сочленения Приазовского мегаблока и Донбасса, приурочены к району развития пространственно и временно сопряженного гидротермального уранового оруденения и кимберлитового магматизма в районе размещения трубок Южная, Новолашинская. Структура мантии здесь сильно изменчива. Гранаты относятся к низкотемпературной геотерме в нижней СКЛМ, в то время как пироксеновые и хромитовые, а также жилы Ilm-Crx-Phl соответствуют более высокотемпературным

условиям. Пиропы гарцбургитового парагенезиса алмаз-пироповой фазии глубинности встречаются крайне редко (Гейко и др., 2006). Однако единичные находки пиропов и хромшпинелидов алмазной ассоциации, мелких алмазов позволяют предполагать мелкие локальные очаги генерации кимберлитовых магм на границе алмаз и графит-пироповой фазии глубинности на глубине до 250 км (рис. 3). По данным интерпретации СЭМЭЗ (метод спонтанной электромагнитной эмиссии Земли) под Донбассом и северо-восточной частью Приазовского мегаблока верхняя граница астеносферы находится на глубине около

140 км (Пашкевич и др., 2018) (рис. 3). Мантийный разрез под Волновхской металлогенической зоной в позднедевонское время состоял из семи слоев с резкой границей между нижней и верхней частью СКЛМ при 4,2 ГПа.

На левобережье Днепра в бассейне р. Ворсклы в юго-восточной части ДДП выявлена Краснокутская алмазонасная россыпь. Предполагается, что коренной источник алмазов Краснокутской россыпи располагается в районе Воронежского кристаллического массива. По данным интерпретации СЭМЗЗ в зоне сочленения Донбасса и ВКМ верхняя граница астеносферы находится на глубине около 170–180 км (Пашкевич и др., 2018) (рис. 4).

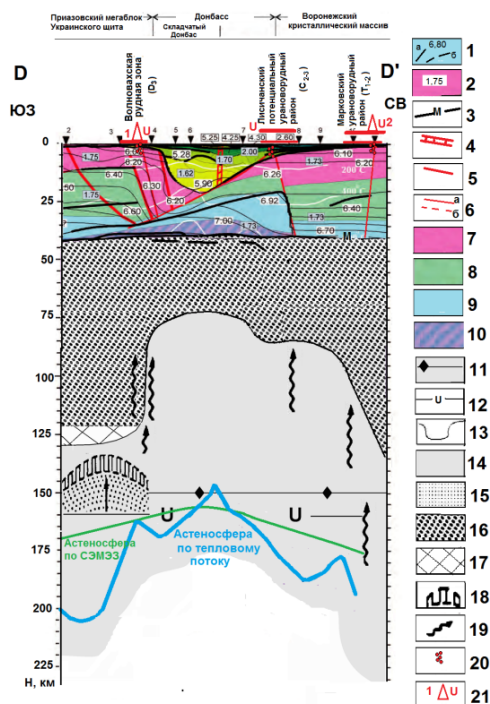


Рис. 4. Скоростная сейсмическая модель Р-волн коры и верхней мантии и петрологическая модель литосферы вдоль профилей DOBRE'99, DOBRE'2000 (по материалам Пашкевич и др., 2018; Старостенко и др., 2017, а; Lyngsie et al., 2002) (положение профиля D-D' на рис. 1):

- 1 – изолинии скорости продольных сейсмических волн (а), предполагаемые (б); 2 – величина отношения V_p/V_s ;
- 3 – положение границы Мохо; разломная тектоника:
- 4 – шовные зоны, 5 – разломы первого ранга, 6 – разломы более высоких рангов (а), предполагаемые (б); состав кристаллической коры: 7 – гранитный слой, 8 – средняя кора, 9 – нижняя кора, 10 – коромантийная смесь; 11 – граница стабильности графит–алмаз; 12 – уровень формирования очаговых потоков ураноносных транслитосферных флюидов; 13 – граница литосфера–астеносфера;
- 14 – астеносфера; 15 – железистые ультрабазиты (железистые дуниты, ильменит-флогопит-гранат-оливиновые породы); 16 – амфиболовые и пироксеновые глиммериты, шпинель-гранатовые, гранатовые лерцолиты;
- 17 – хромшпинельные гарцбургит-лерцолитовая и дунит-перидотитовая серии с реликтами деформированных структур, гранатовые лерцолиты с реликтами деформированных структур; 18 – термобарогradientный фронт глобальной астеносферной ловушки, сформированный вследствие импульсной дегазации ядра и мантии;
- 19 – астеносферные флюидопотоки; 20 – зоны уранового оруденения в приразломных зонах; 21 – месторождения урана: 1 – Николаевское гидротермального типа в минерализованных зонах дробления терригенных и карбонатных толщ, 2 – Марковское осадочно-диагенетического типа в угленосных и содержащих обугленную органику в толщах карбона

В Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции отмечается закономерная связь урановых

объектов с зонами резкого изменения мощности литосферы и формированием барогradientных зон в астеносфере, в процессе эволюции Земли в присклоновых частях Приазовского литосферного сегмента северо-восточного склона Украинского щита и литосферного сегмента юго-западного склона ВКМ, обеспечившим изменения составов мантийных флюидов и инверсию форм переноса рудогенных компонентов к верхним горизонтам земной коры по разломам транслитосферного проникновения.

Размещение подавляющего большинства урановорудных объектов в Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции контролируют протяженные глубинные разломные зоны. Такие протяженные нарушения сплошности литосферы являются типичными для рифтогенеза. При этом обращает на себя внимание то обстоятельство, что подавляющее большинство выявленных уранопоявлений ДДП располагаются группами, тяготеющими к краевым шовным зонам ДДА, к глубинным региональным разломам, пересекающим всю территорию ДДВ, и к узлам их пересечения, а также к зоне сочленения центрального грабена Днепровской впадины и ДСС, характеризующейся крайне сложным планом разрывной тектоники.

Общей является закономерность положительных результатов поисков объектов уранового оруденения района исследований в зонах нарушения гомогенности среды, ее расслоенности (изменение количества и качества отражающих сейсмических границ, деформированность поверхности Мохо), с которыми, как правило, связаны глубинные разломные структуры, узлы пересечения разнонаправленных тектонических зон с проявленными гидротермальными процессами. Кроме того, гидротермальное урановое оруденение с промышленными рудоконцентрациями, как правило, приурочено к разломам, секущим всю осадочную толщу региона и в различных концентрациях локализовано в разных стратиграфических горизонтах от карбона до юры, что свидетельствует о многоэтажности оруденения. Это можно объяснить наиболее благоприятным структурным положением зон оруденения в определенных структурных горизонтах в приразломных зонах в определенный период рудообразования.

Основная причина отсутствия крупномасштабного уранового рудогенеза в регионе, вероятно, заключается в отсутствии длительного существования особо благоприятных петрологических условий для первичной аккумуляции рудоносных ураноносных флюидов в мантии и соответствующей этому мощности литосферы, а также из-за отсутствия длительной транслитосферной проницаемости флюидопроводимых каналов.

Эволюционные металлогенические тренды регионального уровня для ДДА отличаются большим разнообразием (урановая, полиметаллическая, ртутная, флюоритовая и другие виды минерализации), что, вероятно, обусловлено влиянием ряда глубинных факторов, таких как резкое изменение мощности литосферы в присклоновых частях УЩ, ВКМ и формирование барогradientных зон в астеносфере в процессе эволюции Земли, что приводило к формированию различных РТ-условий в астеносфере, обеспечивавших изменения составов мантийных флюидов и инверсию форм переноса рудогенных компонентов к верхним горизонтам земной коры по разломам транслитосферного проникновения. На финальную стадию рудоотложения на верхних структурных горизонтах земной коры также оказывали влияние эволюция магматических очагов, постмагматических растворов в подкорковых очагах, эволюция гидротермальных растворов и т.д., непосредственно связанных с глубинными процессами.

Таким образом, металлогенический облик Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции определяется следующими пространственно-временными закономерностями формирования и размещения урановорудных объектов:

- связью с очаговыми структурами многократно проявленного магматизма различного состава, гидротермальной деятельностью, ореолами вторичных метасоматических изменений вмещающих пород в пределах глубинных разломов и узлов их пересечения над зонами резкого изменения мощности литосферы и формирования бароградиентных зон в астеносфере в процессе эволюции Земли, проявленных в присклоновых частях Приазовского литосферного сегмента северо-восточного склона Украинского щита и литосферного сегмента юго-западного склона ВКМ, а также в зоне сочленения центрального грабена ДДВ и Донецкого складчатого сооружения в периоды тектоно-магматических и тектоно-метасоматических активизаций.

- связью уранопроявлений различного ранга с длительно существовавшими флюидопроводимыми каналами транслитосферного проникновения, приуроченными к краевым шовным зонам восточного склона УЩ и юго-западного склона Воронежского кристаллического массива, к глубинным региональным разломам, пересекающим всю территорию ДДВ, а также к зоне сочленения центрального грабена Днепровской впадины и ДСС, которые обеспечивали привнос рудообразующих компонентов в периоды активизации мантии, а также эволюцию ураноносных растворов и многоэтапность переотложения урана при гидротермальных и инфильтрационных процессах;

- в пределах Складчатого Донбасса, его сочленении с Приазовским мегаблоком и Днепровским грабеном отмечается четко выраженный структурный контроль уранового, сурьмяно-ртутного, полиметаллического и флюоритового оруденений, которые часто сопряжены, что особенно характерно для узлов пересечения разнонаправленных разломов, поскольку им присущи наиболее интенсивная дислоцированность пород, интрузивный магматизм и рудоносность;

- пространственная приуроченность уранопоявлений с промышленными параметрами к зонам глубинных разломов, секущих кристаллический фундамент и весь перекрывающий его чехол. Данная закономерность позволяет предположить, что оруденение в зонах влияния таких разломов относится к гидротермальному типу в минерализованных зонах дробления и играет, на наш взгляд, ведущую роль в формировании урановорудных объектов Днепровско-Донецкой впадины и Складчатого Донбасса;

- подавляющее большинство выявленных уранопоявлений ДДП приурочено к отложениям карбона и нижнего триаса;

- наибольшая насыщенность уранопоявлениями отмечается в разломных зонах в центральной части ДДВ и в зоне сочленения последней с Донецкой складчатой областью, на Самарско-Торецком поднятии;

- самые крупные урановые объекты региона приурочены к отложениям триаса – это основные руды Адамовского, Краснооскольского и Берекского месторождений, залегающие в песчаниках и алевролитах, реже глинах дриновской свиты нижнего триаса, связанные с урановыми битумами в пределах разломных зон.

Полтавская металлогеническая область относится к одной из самых перспективных частей Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции, где урановое оруденение с промышленными параметрами отличается значительным размахом и масштабами про-

явления. В ее пределах открыто и разведано три месторождения урана (Краснооскольское, Берекское, Адамовское), оценено в различной степени семь крупных рудопоявлений (Петровское, Картамышское, Бантышевское, Троицкое, Ново-Дмитриевское, Степковское, Беляевское), выявлено 11 проявлений урановой минерализации и 95 радиоактивных аномалий. Указанные месторождения и крупные рудопоявления локализованы в Славянском урановорудном районе (рис. 1) Полтавской металлогенической области. Характерной особенностью этих рудных объектов является их приуроченность к купольным структурам, расположением их в пределах тектонических зон различного ранга или в непосредственной близости от них. Недостаточной изученностью бурением в Славянском урановорудном районе отличаются шесть перспективных площадей, представляющих собой группы сближенных поднятий и куполов, где на доступную для опробования глубину выведены породы ураноносной нижнетриасовой пестроцветной геологической формации с признаками уранового оруденения: Алексеевско-Лозовеньковская, Беляевская, Волвенковско-Спиваковская, Новомечибиловская, Карнауховская, Святогорская.

В пределах Лохвицкой металлогенической области выявлено четыре крупных рудопоявления урана: Погаршинское, Качановское, Рыбальское, Чернухинское, два из которых (Погаршинское и Качановское) по масштабам оруденения близки к месторождениям, но отличаются очень большой глубиной залегания урановых руд (1600–1900 м), что не позволяет отнести их к рангу перспективных объектов для первоочередных исследований.

В пределах Донецкой металлогенической области ведущими генетическими типами уранового оруденения являются: гидротермальный – в зонах дробления осадочных толщ и осадочно-диагенетический – в углистых и содержащих обугленную органику породах. С ними здесь связаны основные перспективы открытия месторождений урана с контрастными рудами. Здесь выделен Лисичанский потенциальный урановорудный район (рис. 1), на территории которого выявлено три рудопоявления урана (Врубовское, Привольное, Шахты 6-7-17), шесть проявлений урановой минерализации и 62 радиоактивные аномалии.

Троицко-Стрельцовская металлогеническая зона (рис. 1) находится в пределах Старобельско-Миллеровской моноклинали. Здесь выявлены два месторождения урана: Марковское на Украине и Шептуховское в РФ, три рудопоявления (Донцовско-Каменское, Терновское-1, Новострельцовское) и 30 радиоактивных аномалий. Все выявленные месторождения и рудопоявления отнесены к осадочно-диагенетическому типу в углях и углистых породах и приурочены к узлам пересечений зон северо-западного, близмеридионального и субширотного направлений. В пределах Троицко-Стрельцовской металлогенической зоны выделен Марковский урановорудный район (рис. 1). Кроме урана, на Марковском месторождении встречено свинцово-цинковое оруденение прожилкового типа в афанитовых известняках, которое осталось не оцененным. Урановые руды Марковского месторождения и выявленных рудопоявлений отнесены к осадочно-диагенетическому типу в углях и углистых породах. На выявленных рудопоявлениях богатого оруденения не выявлено. Степень специализированной на уран изученности различная, однако значительные перспективы обнаружения новых месторождений отсутствуют.

Павлоградский отдельный потенциально урановорудный район занимает особое место в ДДП и не входит в состав ни одной из выделенных здесь металлогенических областей или зон. Его своеобразие заключается в том,

что он располагается на стыке собственно Днепровской впадины со Складчатым Донбассом. Здесь выявлено два крупных рудопоявления (Петропавловское, Шестаковское), шесть проявлений урановой минерализации, около 200 радиоактивных аномалий. Для большинства из них отмечается пространственная связь с разрывными нарушениями различных направлений. В пределах Павлоградского потенциально уранового района выявление промышленных месторождений мы связываем с двумя типами оруденения: гидротермального – в зонах дробления терригенных толщ и осадочно-диагенетического – в углях, угленосных и содержащих обугленную органику породах.

Черниговская отдельная рудоперспективная территория пространственно совпадает с Брагинско-Лоевским (Черниговским) выступом. Урановых объектов ранга месторождение, рудопоявление и проявление урановой минерализации здесь пока не обнаружено, однако выявлены 11 радиоактивных аномалий. Преобладающим генетическим типом скоплений урана является осадочно-диагенетический в углесодержащих и углистых породах. Специализированная на уран изученность очень слабая. Однако положительным фактором является наличие обширных площадей с аномальным содержанием урана как в водах, так и в донных отложениях рек в северной и южной частях Черниговской рудоперспективной территории.

Выводы и направление дальнейших исследований. Региональный металлогенический тренд Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции определяется в основном геологической предисторией и закономерной сменой геодинамических событий, которые тесно связаны с глубинными процессами и перестройками литосферы. В пределах Складчатого Донбасса, в зоне его сочленения с Приазовским мегаблоком и Днепровским грабеном отмечается четко выраженный структурный контроль уранового, сурьмяно-ртутного, полиметаллического и флюоритового оруденения, которые часто сопряжены. Положение установленных здесь урановорудных районов, вероятнее всего, указывает на положение астеносферных каналов, обогащенных ураном – потенциальных источников рудообразующих флюидных потоков. Установленные минеральные парагенезисы урана с ртутью в регионе свидетельствуют о том, что расположение мантийных корней ртутных формаций, контролируемое почти исключительно структурными неоднородностями глубин, совпадает с локализацией ловушек первичной мантийной аккумуляции различных рудогенных компонентов, включая уран. Промышленно ртутноносными на определенной стадии развития могли стать лишь те части ДДА (Никитовское рудное поле), в которых возникла высокая локальная транслитосферная проницаемость, сочетающаяся с надвигами, которые экранировали ртутные мантийные флюиды и создавали благоприятные условия для ее аккумуляции в проницаемых пластах осадочных пород.

Следует особо отметить пространственную приуроченность уранового оруденения к зонам разломов, расщепляющих кристаллический фундамент и весь перекрывающий его осадочный чехол. Данная закономерность позволяет предположить, что оруденение в зонах влияния таких разломов относится к гидротермальному типу в минерализованных зонах дробления и играет, на наш взгляд, ведущую роль в формировании рудных объектов Днепровско-Донецкой впадины и Складчатого Донбасса.

На основании совместного анализа особенностей глубинного строения и геологических обстановок локализации известных месторождений, рудопоявлений и проявлений урановой минерализации, выявленных геологических ураноносных формаций, распространенности и глубины залегания последних в Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции, следует ожидать открытия новых месторождений урана в районе исследований следующих четырех типов (в порядке убывания перспективности):

1) гидротермального в минерализованных зонах разломов с прожилково-вкрапленными рудами в песчаниках и алевролитах нижнего–среднего триаса; в песчаниках, песчано-глинистых сланцах и известняках карбона, реже в песчаниках и алевролитах нижней перми (руды этого типа, как правило, представляют ураносодержащими твердыми битумами, реже настураном, и сопровождаются сульфидами меди, свинца, цинка, железа);

2) осадочно-диагенетического в угленосных и содержащих обугленную органику толщах карбона;

3) экзогенно-эпигенетического инфильтрационного с вкрапленными рудами в пестроцветных песчаниках с обугленной растительной органикой карбона;

4) осадочно-диагенетического с вкрапленными рудами в фосфоритах и фосфоритсодержащих песчаниках мела.

Полтавская металлогеническая область относится к одной из самых перспективных частей Доно-Днепровской потенциальной урановорудной провинции, где урановое оруденение с промышленными параметрами отличается значительным размахом и масштабами проявления. В Славянском урановорудном районе выделены шесть перспективных площадей для выявления новых месторождений урана: Алексеевско-Лозовеньковская, Беляевская, Волвенковско-Спиваковская, Новомечибиловская, Карнауховская, Святогорская.

В пределах Донецкой металлогенической области ведущими генетическими типами уранового оруденения являются гидротермальный – в зонах дробления осадочных толщ и осадочно-диагенетический – в углистых и содержащих обугленную органику породах. С ними здесь связаны основные перспективы открытия новых месторождений урана с контрастными рудами в пределах Лисичанского потенциального урановорудного района.

В пределах Павлоградского потенциально уранового района перспективы выявления промышленных месторождений мы связываем с двумя типами оруденения: гидротермального – в зонах дробления терригенных толщ и осадочно-диагенетического – в углях, угленосных и содержащих обугленную органику породах.

Кроме того, существует ряд территорий, где имеются предпосылки для выявления уранового оруденения промышленных типов, но они имеют весьма слабую геологическую и специальную на уран изученность, в частности Черниговская уранорудоперспективная территория в пределах ДДВ, в рамках которой необходимо сосредоточить дальнейшие исследования на наиболее перспективных площадях, выделенных по результатам более детального прогнозирования.

Список использованных источников

- Абрамович, И.И. (2010). Металлогения. Москва : ГЕОКАРТ; ГЕОС.
Ильченко, Т.В. (1992). Сейсмическая модель земной коры по профилю ГСЗ Приазовский массив-Донбасс-Воронежский массив. *Геофизический журнал*, 5(14), 50–59.
Калашник, А.А. (2013). Геолого-структурные особенности экзогенно-инфильтрационных месторождений урана в Ингуло-Ингулецком рудном районе Украинского щита. *Науковий вісник НГУ*, 3, 11–18.
Калашник, А.А. (2015). Глубинные факторы формирования крупных U-V-TR-Sc месторождений в метасоматитах на Украинском щите. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, 2, 68–72.

Калашник, А.А. (2014). Прогнозирование крупных эндогенных месторождений урана с учетом особенностей строения литосферы Украинского щита. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*, 2, 5–12.

Калашник, А.А. (2016). Закономерности формирования урановорудных метасоматитов в связи с особенностями глубинного строения литосферы Украинского щита. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 3(74), 51–57.

Калашник, А.А., Кузьмин, А.В. (2018). Металлогеническое разнообразие Волноватской рудной зоны в связи с особенностями глубинного строения литосферы УЩ. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 2(81), 49–55.

Корчин, В.А., Буртний, П.А., Кобелев, В.П. (2013). Термобарическое и петробарическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка.

Лукин, А.Е. (2009). Самородно-металлические микро- и нановключения в формациях нефтегазоносных бассейнов – трассеры суперглубинных флюидов. *Геофизический журнал*, 2(31), 61–92.

Нечаев С.В. (1970). Минерализация Волноватской зоны разломов. Киев: Наук. думка.

Пашкевич, И.К., Орлюк, М.И., Лебедь, Т.В. (2014). Магнитная неоднородность, разломная тектоника консолидированной земной коры и нефтегазоносность Днепровско-Донецкого авлакогена. *Геофизический журнал*, 1(36), 12–21.

Пашкевич, И.К., Русаков, О.М., Кутас, Р.И. и др. (2018). Строение литосферы по комплексному анализу геолого-геофизических данных вдоль профиля DOBRefraction99/DOBRE-2 (Восточно-Европейская платформа – Восточно-Черноморская). *Геофизический журнал*, 5(40), 98–136.

Гейко, Ю.В., Гурский, Д.С., Лыков, Л.И., Металиди, В.С., Павлюк, В.Н., Приходько, В.Л. и др. (2006). Перспективы коренной алмазности Украины. Киев–Львов. Из-во "Центр Европы".

Соллогуб, В.Б. (1986). Литосфера Украины. Киев: Наук. думка.

Старостенко, В.И., Пашкевич, И.К., Макаренко, И.Б., Купrienko, П.Я., Савченко А.С. (2017а). Неоднородность литосферы Днепровско-Донецкой впадины и ее геодинамические следствия. Ч. 1. Глубинное строение. *Геодинаміка*, 1(22), 125–138.

Старостенко, В.И., Пашкевич, И.К., Макаренко, И.Б., Купrienko, П.Я., Савченко А.С. (2017б). Геодинамическая интерпретация геолого-геофизической неоднородности литосферы Днепровско-Донецкой впадины. *Доповіді національної академії наук України*, 9, 84–94.

Степанюк, Л.М., Бондаренко, С.М., Сьомка, В.О., Котвицька, І.М., Андреев, О.В. (2012). Джерело натрію та урану ураноносних альбітитів на прикладі Докучаєвського родовища Інгільського мегаблоку УЩ. *Тези доповідей наукової конференції "Теоретичні питання і практика дослідження метасоматичних порід і руд", 14–16 бер. 2012, Київ*. Київ: Ін-т геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М.П. Семенченка НАН України, 78–80.

Стовба, С.Н., Стивенсон, Р.А. (2000). Сравнительный анализ строения и истории формирования юго-восточной части Днепровско-Донецкой впадины и Донецкого складчатого сооружения. *Геофизический журнал*, 4(22), 37–61.

Шеремет, Е.М., Бурахович, Т.К., Николаев, И.Ю. (2017). Геоэлектрические исследования при поисках углеводородов в Украине. *Теория и практика разведочной и промысловой геофизики*, 1, 122–125.

Шумлянский, В.А. (1981). Древнециммерийская рудно-битумная минерализация Доно-Днепровского прогиба и Вольно-Подольской плиты // Геологические и геохимические основы поисков нефти и газа. Киев: Наук. думка, 215–230.

Шумлянский, В.А., Сушук, Е.Г., Макаренко, Н.Н. (1995). Генезис и закономерности размещения рифейских и фанерозойских месторождений урана // Генетические типы и закономерности размещения урановых месторождений Украины. Киев: Наук. думка, 308–370.

Ashchepkov, I.V., Logvinova, A.M., Ntaflos, T., Vladyskin, N.V., Kostrovitsky, S.I., Spetsius, Z., Mityukhin, S.I., Prokopyev, S.A., Medvedev, N.S., Downes, H. B. (2017). Alakit and Daldyn kimberlite fields, Siberia, Russia: two types of mantle sub-terrane beneath central Yakutia? *Geoscience Frontiers*, 8, 671–692.

Ashchepkov, I.V., Ntaflos, T., Logvinova, A.M., Spetsius, Z.V., Downes, H., Vladyskin, N.V. (2017a). Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems. *Geoscience Frontiers*, 8, 775–795.

Ashchepkov, I.V., Pokhilenko, N.P., Vladyskin, N.V., Logvinova, A.M., Kostrovitsky, S.I., Afanasiev, V.P., Pokhilenko, L.N., Kuligin, S.S., Malygina, L.V., Alymova, N.V., Khmelnikova, O.S., Palesky, S.V., Nikolaeva, I.V., Karpenko, M.A., Stagnitsky, Y.B. (2010). Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study. *Tectonophysics*, 485, 17–41.

Ashchepkov, I.V., Vladyskin, N.V., Kalashnyk, H.A., Medvedev, N.S., Saprykin, A.I., Downes, H., Khmelnikova, O.S. (2020). Incompatible element-enriched mantle lithosphere beneath kimberlitic pipes in Priazov'ie, Ukrainian shield: volatile-enriched focused melt flow and connection to mature crust? *International Geology Review*, 62, 1–22.

Lyngsie, S., Thubo, H., Lang, R. (2002). Rifting and lower crustal reflectivity: A case study of the intra-cratonic Dniepr-Donets rift zone, Ukraine. *Submitted to Journal of Geophysical Research*, 1–26.

O'Neill, H.St. C., Wood, B.J. (1979). An experimental study of Fe-Mg-partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 59–70.

Taylor, W.R., Kammerman, M., Hamilton, R. (1998). New thermometer and oxygen fugacity sensor calibrations for ilmenite and chromium spinel-bearing peridotitic assemblages. *Extended abstracts of the 7th International Kimberlite Conference, Cape Town*, 891–901.

References

Abramovich, I.I. (2010). Metallogeny. Moscow: GEOKART; GEOS. [in Russian]

Ashchepkov, I.V., Logvinova, A.M., Ntaflos, T., Vladyskin, N.V., Kostrovitsky, S.I., Spetsius, Z., Mityukhin, S.I., Prokopyev, S.A., Medvedev, N.S., Downes, H. B. (2017). Alakit and Daldyn kimberlite fields, Siberia, Russia: two types of mantle sub-terrane beneath central Yakutia? *Geoscience Frontiers*, 8, 671–692.

Ashchepkov, I.V., Ntaflos, T., Logvinova, A.M., Spetsius, Z.V., Downes, H., Vladyskin, N.V. (2017a). Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems. *Geoscience Frontiers*, 8, 775–795.

Ashchepkov, I.V., Pokhilenko, N.P., Vladyskin, N.V., Logvinova, A.M., Kostrovitsky, S.I., Afanasiev, V.P., Pokhilenko, L.N., Kuligin, S.S., Malygina, L.V., Alymova, N.V., Khmelnikova, O.S., Palesky, S.V., Nikolaeva, I.V., Karpenko, M.A., Stagnitsky, Y.B. (2010). Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study. *Tectonophysics*, 485, 17–41.

Ashchepkov, I.V., Vladyskin, N.V., Kalashnyk, H.A., Medvedev, N.S., Saprykin, A.I., Downes, H., Khmelnikova, O.S. (2020). Incompatible element-enriched mantle lithosphere beneath kimberlitic pipes in Priazov'ie, Ukrainian shield: volatile-enriched focused melt flow and connection to mature crust? *International Geology Review*, 62, 1–22.

Ilchenko, T.V. (1992). Seismic model of the earth's crust along the DSS profile Priazovsky Massif-Donbass-Voronezhsky Massif. *Geophysical Journal*, 5(14), 50–59. [in Russian]

Geiko, Y.V., Gursky, D.S., Lykov, L.I., Metalidi, V.S., Pavlyuk, V.N., Prykhodko, V.L. et al. (2006). Perspectives of basement diamond productivity of Ukraine. Kyiv: Izd-vo "Tsentr Evropy". [in Russian]

Kalashnyk, A.A. (2013). Geological and structural features of exogenous-infiltration uranium deposits in the Ingulo-Inguletsky uranium ore region of the Ukrainian Shield. *Naukovyi visnyk natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 3, 11–18. [in Russian]

Kalashnik, A.A. (2015). Deep factors of forming of major U-V-TR-Sc deposits in metasediments within The Ukrainian Shield. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2, 68–72. [in Russian]

Kalashnik, A.A. (2014). Prognostication of major endogenous uranium deposits with take into account to features of the Ukrainian Shield lithosphere structure. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*, 2, 5–12. [in Russian]

Kalashnyk, G. (2016). Patterns of uranium ore metasediments localization in association with features of the Ukrainian Shield lithosphere's deep structure. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 3(74), 51–57. [in Russian]

Kalashnyk, G., Kuzmin, A. (2018). Metallogenic diversity of the Volnovahskaya ore area in connection with features of Ukrainian Shield lithosphere's deep structure. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 2(81), 49–55. [in Russian]

Korchin, V.A., Burtyn, P.A., Kobleev, V.P. (2013). Thermobaric petrobaric modeling in geophysics. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]

Lyngsie, S., Thubo, H., Lang, R. (2002). Rifting and lower crustal reflectivity: A case study of the intra-cratonic Dniepr-Donets rift zone, Ukraine. *Submitted to Journal of Geophysical Research*, 1–26.

Lukin, A.E. (2009). Native metallic micro- and nanoinclusion in the formations of oil and gas content basins – tracers of super deep fluids. *Geofizicheskij zhurnal*, 31(2), 61–92. [in Russian]

Nechaev, S.V. (1970). Mineralization of the Volnovakha fault zone. Kyiv: Naukova Dumka [in Russian]

O'Neill, H.St. C., Wood, B.J. (1979). An experimental study of Fe-Mg-partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70, 59–70.

Pashkevich, I.K., Orlyuk, M.I., Lebed, T.V. (2014). Magnetic data, fault tectonics of consolidated Earth crust and oil- and gas content of the Dniepr-Donets avlakogen. *Geophysical Journal*, 1(36), 12–21. [in Russian]

Pashkevich, I.K., Rusakov, O.M., Kutas, R.I., Gryn, D.N., Starostenko, V.I., Janik, T. (2018). Lithospheric structure based on integrated analysis of geological-geophysical data along the DOBRefraction99/DOBRE-2 profile (the East European Platform the East Black Sea Basin). *Geophysical Journal*, 5(40), 98–136. [in Ukrainian]

Sheremet, E.M., Burakhovich, T.K., Nikolaev, I.Yu. (2017). Geoelectric research in the search for hydrocarbons in Ukraine. *Teoriya i praktika razvedochnoy i promyslovyoy geofiziki*, 1, 122–125. [in Russian]

Shumlyansky, V.A. (1981). Ancient Cimmerian ore-bitumen mineralization of the Don-Dnieper trough and Volyn-Podolsk plate. In: Geological and geochemical foundations of oil and gas exploration. Kyiv: Naukova Dumka, 215–230. [in Russian]

Shumlyansky, V.A., Suschuk, E.G., Makarenko, N.N. (1995). Genesis and patterns of distribution of Riphean and Phanerozoic uranium deposits. In: Genetic types and patterns of distribution of uranium deposits in Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka, 308–370. [in Russian]

Sollogub, V.B. (1986). Lithosphere of the Ukraine. Kyiv: Naukova Dumka. [in Russian]

Starostenko, V.I., Pashkevich, I.K., Makarenko, I.B., Kuprienko, P.Ya, Savchenko, O.S. (2017a). Lithosphere heterogeneity of the Dniepr-Donets Basin and its geodynamical consequences. Part 1. Deep structure. *Geodynamic*, 1(22), 125–138. [in Ukrainian]

Starostenko, V.I., Pashkevich, I.K., Makarenko, I.B., Kuprienko, P.Ya, Savchenko, O.S. (2017b). Geodynamical interpretation of the geological and

geophysical heterogeneity of the Dnieper-Donets basin lithosphere. *Dopovidi natsional'noyi akademiyi nauk Ukrayiny*, 9, 84–94. [in Russian]

Stepanjuk, L.M., Bondarenko, S.M., Somka, V.O., Kotvitska, I.M., Andreev, O.V. (2012). Source of sodium and uranium of uraniferous albitites on the example of Dokuchaievsk field of the Ingulsky megablock of the UkrSh. *Tezy dopovidey naukovoyi konferentsiyi "Teoretychni pytannya i praktyka doslidzhennya metasomatychnykh porid i rud"*, March 14–16, 2012, Kyiv, 78–80. [in Ukrainian]

Stovba, S.N., Stephenson, R.A. (2000). Comparative analysis of the structure and history of the formation of the southern part of the Dnieper-

Donets Basin and Donets Fold Structure. *Geophysical Journal*, 22(4), 37–61. [in Russian]

Taylor, W.R., Kammerman, M., Hamilton, R. (1998). New thermometer and oxygen fugacity sensor calibrations for ilmenite and chromium spinel-bearing peridotite assemblages. *Extended abstracts of the 7th International Kimberlite Conference, Cape Town*, 891–901.

Надійшла до редколегії 30.06.2020

G. Kalashnyk, Dr. Sci. (Geol.), Senior Researcher, Prof.,
E-mail: kalashnik_anna1@ukr.net;
Flight Academy of National Aviation University,
1 Dobrovolskogo Str., Kropyvnytskyi, 25005, Ukraine;
A. Kuzmin, Leading Geologist,
E-mail: avkuzmin@ukr.net;
State enterprise "Kirovgeology",
8/9 M. Boychuk Str., Kyiv, 01103, Ukraine

PATTERNS OF URANIUM-ORE LOCALIZATION IN THE DONO-DNIPROVSKA POTENTIAL URANIUM-ORE METALLOGENIC PROVINCE IN ASSOCIATION WITH LITHOSPHERE'S DEEP STRUCTURE

The objective of the study is to identify the main patterns of uranium-ore localization in the Dono-Dniprovsk potential uranium-ore province in association with lithosphere's deep structure.

The analysis of geophysical, geological, petrological, radiogeochemical information on the features of the formation, placement of uranium occurrences of the different genetic types in the Dnieper-Donets aulacogen in close connection with the features of the deep structure of the lithosphere, asthenosphere, fault tectonics was carried out.

The features of the deep structure of the lithosphere and their physical parameters that affect the conditions of intensive uranium ore genesis in the formation of the main geological industrial types of uranium deposits in the research area were revealed. According to analysis of geological materials (uranium bearing, features of sedimentary-volcanogenic and, to a lesser extent, crystalline rocks occurrence, variety of breaking tectonics at various levels of the geological section, groundwater circulation conditions, etc.) the most perspective for discovering of new uranium deposits horizons and strata assigned to uranium-bearing geological formation in this region were identified. Based on a joint analysis of the geological conditions of localization of uranium deposits, ore occurrences and manifestations of uranium mineralization, geological uranium-bearing formations, their prevalence and depth occurrence in the Dnieper-Donets aulacogen, the four most perspective for this region industrial types of uranium deposits have been identified.

The practical significance of this research is to increase the efficiency of metallogenic forecasts by expanding the deep factors and regional criteria for uranium ore genesis of various genetic types specified to the study area. This makes it possible to reasonably determine the prospects of the territories for the possibility of forming uranium industrial ore concentration with the allocation of areas of their most probable localization.

Keywords: uranium, lithosphere, uranium-bearing geological formation, geological-industrial type, deposit, Dono-Dniprovsk potential uranium-ore province.

Г. Калашник, д-р геол. наук, ст. наук. співроб., проф.,
E-mail: kalashnik_anna1@ukr.net;
Льотна академія Національного авіаційного університету,
вул. Добровольського, 1, м. Кропивницький, 25005, Україна;
А. Кузьмін, пров. геолог,
E-mail: avkuzmin@ukr.net;
Казенне підприємство "Кіровгеологія",
вул. М. Бойчука, 8/9, м. Київ, 01103, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗМІЩЕННЯ УРАНОВОРУДНИХ ОБ'ЄКТІВ У ДОНО-ДНІПРОВСЬКІЙ ПОТЕНЦІЙНІЙ УРАНОВОРУДНІЙ МЕТАЛОГЕНІЧНІЙ ПРОВІНЦІЇ У ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ГЛИБИННОЮ БУДОВОЮ ЛІТОСФЕРИ

Метою проведеної роботи є виявлення основних закономірностей розміщення урановорудних об'єктів у Доно-Дніпровській потенційній урановорудній провінції у зв'язку з глибинною будовою літосфери.

Виконано аналіз геофізичної, геологічної, петрологічної, радіогеохімічної інформації щодо особливостей формування, розміщення уранопроїв різних генетичних типів у Дніпровсько-Донецькому авлакогені в тісному зв'язку з особливостями глибинної будови літосфери, астеносфери, розломною тектонікою.

Виявлено особливості глибинної будови літосфери та її фізичні параметри, які впливали на умови інтенсивного рудогенезу при формуванні основних геолого-промислових типів родовищ урану в районі досліджень. За результатами аналізу геологічних матеріалів (ураноносність, особливості залягання осадово-вулканогенних і, меншою мірою, кристалічних порід, різноманітність розривної тектоніки на різних рівнях геологічного розрізу, умови циркуляції підземних вод і т.д.) виділено найбільш перспективні для виявлення нових уранових родовищ горизонти і товщі, віднесені до ураноносних геологічних формацій району досліджень. На підставі спільного аналізу геологічних ситуацій локалізації відомих родовищ, рудопроїв і проявів уранової мінералізації, виділених геологічних ураноносних формацій, їхньої поширеності й глибини залягання останніх у Дніпровсько-Донецькому авлакогені, виділено чотири найбільш перспективні для відкриття в регіоні досліджень промислових типи родовищ урану.

Практичне значення проведеного дослідження полягає в підвищенні ефективності металогенічних прогнозів за рахунок розширення глибинних чинників і регіональних критеріїв уранового рудогенезу різних генетичних типів, характерних для регіону досліджень. Це дозволяє обґрунтовано визначати перспективи територій на можливість формування промислових рудоконцентрацій урану з виділенням площ найбільш вірогідної їхньої локалізації.

Ключові слова: уран, літосфера, ураноносна геологічна формація, геолого-промисловий тип, родовище, Доно-Дніпровська потенційна урановорудна провінція.

УДК 55:504:574

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.11>

М. Коржнев, д-р геол.-мінералог. наук, проф.,
E-mail: mnkorzhnev@gmail.com;
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору,
бул. Чоколівський, 13, м. Київ, 03386, Україна;
М. Курило, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua;
С. Кошарна, канд. геол. наук,
E-mail: sofia.kosharna@ukr.net;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ІНІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

ПІДХОДИ ДО ПЛАНУВАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНА НА СТАДІЇ ПОСТ-МАЙНІНГУ

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

Проблеми навколишнього середовища на територіях пост-майнінгу України критично погіршують умови життєдіяльності населення і не сприяють зростанню країни на умовах сталого розвитку. Програми їхньої екологічної реабілітації та подальшого розвитку мають бути індивідуальними, з урахуванням специфіки територій. До переліку критеріїв, які впливають на специфіку оцінки ризиків у Криворізькому басейні, можна віднести атиповість ландшафту, що виражена у формах техногенного рельєфу і створює умови для активізації екзогенних геологічних процесів. Будь-які програми екологічної реабілітації мають спиратися на постійно діючу прогнозу модель геологічного середовища Кривбасу, в основу якої мають бути покладені налагоджені системи моніторингу різних його складових (гідрогеологічного, інженерно-геологічного, сейсмічного, забруднення ґрунтів і поверхневих водоем та ін.). При створенні й функціонуванні такої моделі фінансові ресурси будуть розподілятися більш раціонально на попередження і вирішення конкретних екологічних проблем, які можуть виникати у випадку реалізації розрахованих у такій моделі найбільших екологічних ризиків. Зроблений прогноз витрат на моніторинг для типових об'єктів пост-майнінгу Кривбасу із завершенням їхнього фактичного життєвого циклу базується на використанні середньозваженої вартості моніторингу, що проводиться інвесторами на словацьких об'єктах. Проведений для криворізьких об'єктів аналіз двох варіантів визначення балансових запасів, один з яких включає розраховані постліквідаційні витрати, доводить реальність запропонованого шляху забезпечення користувачів надр більш якісною сировиною, а навколишнього середовища – меншими впливами від гірничодобувної діяльності.

Метою дослідження є визначення основних підходів до планування сталого розвитку Криворізького басейна на стадії пост-майнінгу. Намічені напрями забезпечення сталого розвитку Кривбасу та підходи до екологічної реабілітації його території.

Ключові слова: території пост-майнінгу, екологічний моніторинг, екологічні ризики, постійно діюча пронозна модель геологічного середовища, напрями забезпечення сталого розвитку Кривбасу, програми екологічної реабілітації.

Вступ. Умови життя в країнах, залежних від гірничорудної промисловості, останні десятиліття рік від року неухильно погіршуються. У країнах, що розвиваються, тобто експортерах природних корисних копалин, доля населення, що живе на менш ніж на 1 долар у день, виросла із 61 % у 1981–1983 рр. до 82 % у 1997–1999 рр. Економічна залежність від розробки родовищ мінеральної сировини вповільнила і навіть понизила економічне зростання таких країн. Гарвардські економісти Джеффри Сэчс (Jeffrey Sachs) і Ендрю Уарнер (Andrew Warner), які досліджували 95 країн, що розвиваються ще в 90-х рр., минулого століття дійшли висновку, що чим вище коефіцієнт ресурсозалежності (відношення експорту природних ресурсів до ВВП), тим нижче рівень росту ВВП на душу населення. Така зворотна залежність між природним багатством і економічним достатком справедлива навіть для багатих добувних країн. Останнім часом стає зрозумілим для багатьох держав, економіка яких пов'язана з видобутком корисних копалин, що проблеми навколишнього середовища на територіях пост-майнінгу (гірничодобувних регіонів і районів на завершальних стадіях їхнього розвитку) критично погіршують умови життєдіяльності населення і не сприяють зростанню країни на умовах сталого розвитку. Типовим прикладом цього є Україна, у якій ці проблеми досягли критичної межі, а планування сталого розвитку гірничодобувних районів стає актуальним завданням.

Загальні положення та досвід інших країн. За визначенням Міжнародної комісії з проблем навколишнього природного середовища і сталого розвитку (1987) "Сталим можна назвати такий розвиток, який веде до задоволення нагальних потреб суспільства без зменшення можливостей майбутніх поколінь задовольняти їхні потреби". Це означає те, що соціально-економічний розвиток має здійснюватися таким чином, щоб мінімізувати негативні наслідки виснаження природних ресурсів

і погіршення якості довкілля з метою їхнього збереження для майбутніх поколінь. Утрати ресурсів мають бути повністю компенсовані. Такий підхід інтерпретується як необхідність збереження основного капіталу людства, складовими частинами якого є такі види капіталу: K_m – матеріальний (машини, устаткування, основні фонди та ін.); K_h – людський (освітній рівень населення, його технічні навики, здоров'я, генетичний фонд тощо); K_n – природний (природно-ресурсний потенціал, якість довкілля).

На практиці часто використовуються показники сталого розвитку, що трактуються досить широко. Ці показники характеризують сучасне розуміння визначення "сталий розвиток". До них звичайно відносять досить широкий набір індикаторів-показників, відстеження яких у часі дозволяє проводити моніторинг руху країни в досягненні умов сталого розвитку. У сучасний період з метою моніторингу стану сталого розвитку промисловості України з позицій економічної безпеки Інститутом економіки промисловості НАН України запропоновано структуру сталого розвитку, що включає загалом 30 індикаторів і методологію для ідентифікації його рівня через сучасне інтегральне оцінювання (Амоша, 2017).

Поняття сталого розвитку світового суспільства взагалі і окремих держав зокрема має на увазі збалансованість трьох складових розвитку: економічної, екологічної й соціальної. Зростання економіки в більшості випадків збільшує екологічне навантаження на навколишнє природне середовище, яке воно витримує до певних меж, обумовлених асиміляційним потенціалом території, що є причиною відсутності суттєвих змін геосистем. Це справедливо як для країн загалом, так і для її окремих гірничодобувних регіонів. Видобуток корисних копалин надає не лише економічні й соціальні вигоди країнам, де ведеться видобуток і переробка мінеральної сировини, але може спричиняти виникнення екологічних та економічних збитків, особливо на локальному рівні (Mining, Minerals and Sustainable Development, n.d.).

© Коржнев М., Курило М., Кошарна С., 2021

З урахуванням ідей сталого розвитку ще в 1998 р. в Україні були запропоновані загальні рекомендації для використання ресурсів надр, які не містять диференціації за видами користування надрами або регіональними критеріями (Міщенко, 1998):

- формування завершених багатогалузевих комплексів на базі поглибленої переробки сировини, використання у виробництві замкнених технологічних циклів і рециклів для заміни первинних сировинних матеріалів вторинними;

- упровадження маловідходних ресурсозберігаючих технологій у промисловості, зменшення енерго- і матеріаломісткості економіки;

- утворення з окремих видів великотонажних відходів техногенних родовищ вторинної мінеральної сировини та їхнє першочергове використання;

- довгострокове прогнозування стану МСБ за якістю та кількістю окремих видів корисних копалин і створення кадастрів природних ресурсів, пошук нових родовищ мінеральної сировини на принципах еколого-економічної доцільності їхнього освоєння.

До десятої річниці саміту в Ріо-де-Жанейро наприкінці 1998 р. дев'ять найбільших гірничодобувних компаній запропонували нову ініціативу, спрямовану на досягнення серйозних змін у підходах галузі до сучасних її проблем (*Mining, Minerals and Sustainable Development, n.d.*). Через Всесвітню раду підприємців зі сталого розвитку (WBCSD) у травні 1999 р. вони доручили Міжнародному інституту навколишнього середовища і розвитку (IIED) провести оглядове дослідження з метою визначення глобальної проблеми, яку має гірничодобувний сектор у контексті сталого розвитку, і вивчення її ролі у переході до нього. Команда дослідників IIED розглянула існуючі ініціативи і матеріали та проконсультувалась із більш ніж 150 приватними особами й організаціями, щоб зрозуміти їхні погляди на те, як можна поліпшити внесок мінерально-сировинного сектора в сталий розвиток і розробити більш детальну основу для цього процесу. IIED оприлюднив свої результати у жовтні 1999 р., дав рекомендації із змісту та обсягу процесу, який став відомий як проект MMSD (гірнича промисловість, мінеральна сировина і сталий розвиток).

В Україні в 2000 р. була виконана програма ООН "Сприяння сталому розвитку в Україні". Раніше Відділенням наук про Землю Національної академії наук було підготовлено постанову уряду від 31.08.99 №1606 "Про концепцію поліпшення екологічного становища гірничодобувних регіонів України". Потім на її основі підготовлена відповідна державна програма, яка, на жаль, не була повністю реалізована внаслідок великих об'ємів коштів, необхідних для її фінансування.

Програми сталого розвитку гірничодобувної промисловості намагаються розробляти як окремі країни, так і сумісно сусідні країни, економіка яких значно пов'язана з мінерально-сировинним комплексом, і спрямовані вони чи на розв'язання конкретної проблеми, чи на поліпшення загальних умов життєдіяльності місцевого населення (Batterham, 2014; Kokko et al., 2015; Cotula and Mouan, 2018; Mehta, 2002; Chen, 2018; Cojean, 2005 та ін.).

Закриття закинутих шахт та їхніх відновлень – величезна міжнародна проблема, пов'язана з гірничодобувним сектором, за яку держава часто вимушена брати відповідальність на себе. Наприклад, у Португалії в 2010 р. уряд надав державному підприємству EDM (Empresa de Desenvolvimento Mineiro) концесію на розробку і сприяння відновленню навколишнього середовища та соціально-економічному поліпшенню районів, пошкоджених у результаті видобутку корисних копалин (Sardinha, 2010).

EDM було ініціатором створення фундаментальної державної служби, націленої на охорону здоров'я і безпеки населення, підвищення якості навколишнього середовища і соціального благополуччя.

Іншим прикладом може бути Німеччина. До кінця 1950-х рр. німецька вугледобувна промисловість отримала 150 млн т кам'яного вугілля із 170 шахт із 600 000 працівниками. Водночас 70 % потреб в енергетиці ФРН були покриті за рахунок власного вугілля. У подальшому внаслідок просування нафти, а потім природного газу на світовий енергетичний ринок, і зростанням світової торгівлі, у країні було прийнято стратегію довгострокової реструктуризації вугільної галузі. Видобуток вугілля у Німеччині у сучасний період кардинально обмежений, і вона переходить до епохи так званого пост-майнінгу (Kretschmann et al., 2017). Ще на початку 2000-х рр. у Чехії було розроблено загальні, екологічні та ландшафтно-архітектурні принципи рекультивації ландшафтів у пост-майнінговий період (Sklenicka et al., 2004). Останнім часом у Польщі було проаналізовано основні зміни природних ландшафтів у результаті експлуатації бурого вугілля (лігніту) (Fagiewicz and Mękarski, 2018). Сучасний підхід до природного середовища та його захисту характеризується багатогранною інтеграцією в цій проблемі соціальних, економічних і політичних аспектів людського існування. У даному випадку об'єкт управління складається із пост-майнінгових районів. У процесах їхньої рекультивації та освоєння формуються нові елементи природної системи, які також вимагають системного підходу до управління, зокрема управління пост-майнінговими ландшафтами.

Будь-які перетворення в гірничодобувних регіонах на засадах сталого розвитку треба починати з питання, який регіон, що несе певне функціональне навантаження в економіці країни, ми маємо отримати в кінцевому рахунку. Наведемо приклад спроби вирішення цього питання у вугледобувному регіоні Шендонг на півночі Китаю, для якого розроблено загальну послідовність дій, що плануються (Chen, 2018). У гірничодобувному регіоні Шендонг розглядається можливість використання трьох режимів рекультивації земель: 1 – екологічна модель сільського господарства в різних модифікаціях; 2 – модель шахтного парку з органічним поєднанням типового екологічного ландшафту, історико-культурного, рекреаційного та інших ландшафтів; 3 – модель "земельної ділянки" з використанням твердих відходів видобутку з метою створення будівельних майданчиків, що може збільшити площу для планування і будівництва індустріального парку, добуток корисних копалин, градобудівництва і нових сільськогосподарських земель. У шахтному районі Шендонг більш важливим є реалізація останньої моделі з метою сприяння трансформації розвитку соціальної економіки на засадах сталого розвитку.

Економічні, екологічні та соціальні умови кожного гірничодобувного регіону України індивідуальні залежно від виду мінеральної сировини, типу місцевості, її геології, клімату та багато чого іншого. Тому індивідуальними, з урахуванням специфіки регіонів, мають бути програми їхньої екологічної реабілітації та подальшого розвитку.

Екологічні ризики та збитки в Криворізькому басейні. З останніх наукових праць, що розглядають Кривбас як типову територію пост-майнінгу, треба відмітити роботу Г.І. Рудька і Є.О. Яковлева (Рудько та Яковлев, 2018). За їхніми даними: загальна площа Криворізької природно-техногенної геосистеми в межах зони відчуження становить 700 км² за сумарної площі гірничих відводів 350 км²; у межах Кривбасу діють п'ять ГЗК, на яких видобуток залізних руд здійснюють на десяти кар'єрах і на 23 (орієнтовно з допоміжними) шахтах

обсягом до 83 млн т/рік; загальна площа кар'єрів перевищує 42 км², їхній об'єм сягає 6,6 млрд м³ (6,6 км³) з глибинами 300–400 м; у межах басейну сформувалися 44 породні відвали загальною площею 69 км² і об'ємом понад 1,7 млрд м³; десять діючих шламосховищ мають сумарну площу поверхні 71 км² (у них заскладовано 1,6 млрд м³ відходів збагачування залізних руд).

Тією чи іншою мірою при гірничодобувній діяльності зміни відбуваються в усіх його складових: геологічному і водному середовищах, атмосферному повітрі, тваринному і рослинному світах. Відбувається системне втручання, коли загроза (небезпека), яка виникає в одному середовищі, реалізується в іншому. Яскравим прикладом цього може бути взаємопов'язаний характер екологічних загроз, виникнення ризиків і збитків за їхньої реалізації в Криворізькому залізничному басейні України (Коржнев та Малахов, 2012). Насамперед, до переліку критеріїв, які впливають на специфіку оцінки ризиків у Кривбасі, можна віднести атиповість ландшафту, що виражена у формах техногенного рельєфу і створює умови для активізації екзогенних геологічних процесів. Кар'єри та зони обвалення і зсуву можна віднести до денудаційних, а відвали та шламосховища – до акумулятивних форм рельєфу (Коржнев та Малахов, 2012). Процеси денудації надр (розвиток кар'єрів і зон обвалення) супроводжуються створенням акумулятивних, техногенних форм рельєфу – відвалів і шламосховищ. Чинники впливу видобутку і переробки залізних руд на довкілля та техногенні зміни геологічного середовища Кривбасу можна знайти в численних працях, у тому числі й цитованих у нашій статті. Не будимо зупинятися на них детально, а більше приділимо увагу аспектам, що визначають добробут і безпеку життєдіяльності населення та забезпечують розвиток регіону.

Моніторинг у контексті забезпечення розвитку Кривбасу. Будь-яке підприємство (гірничодобувне чи переробне) визначається конкретними екологічними показниками впливу його діяльності на навколишнє середовище, більшість з яких легко вивести на рівень державної статистичної звітності. Такі показники можна згрупувати за наступними основними чинниками впливу (Довгий та ін., 2007, 2019).

- **Порушення породного масиву внаслідок ведення гірничих робіт:** об'єм виробленого простору, зокрема із закладкою, м³; загальна площа просідань поверхні, км²; амплітуда просідань, м; площі підроблення річок, водосховищ, населених пунктів, км²; площа, уражена зсувами, км²; площа, уражена карстом, км².

- **Накопичення відходів гірничодобувного і збагачувального комплексу:** загальна кількість накопичених відходів, зокрема токсичних, тис. т; кількість відходів, тис. т/рік; кількість використаних відходів, тис. т/рік; кількість накопичених відходів, тис. т/рік.

- **Вилучення земель:** загальна кількість, зокрема сільськогосподарського призначення, км²; під промислові споруди (промислові майданчики, хвостосховища, пруди-відстійники тощо), км²; під розміщення відходів і некондиційних корисних копалин (складування вмісних і розкритих порід, некондиційних руд тощо), км².

- **Порушення гідрогеологічного режиму:** площа депресійних воронок, км²; амплітуда воронок, м; площа підтоплених територій, км².

- **Забруднення ґрунтів, вод, повітря:** площі земель, на яких перевищені ГДК за групами забруднювачів, км²; кількість скидів промислових (шахтних, пластових тощо) вод у водне середовище, м³; мінералізація вод, г/л; кількість викидів забруднювальних речовин у повітря та їхній склад.

Наведено дуже приблизний перелік екологічних показників, пов'язаний з діяльністю підприємств мінерально-сировинного комплексу, які треба вивести на рівень державної статистики. Цей перелік потребує ретельного опрацювання для реального відображення впливу підприємства на довкілля, екологічних ризиків, що виникають на території його впливу, та економічних збитків. Останнє стосується не лише прямих збитків і тих, що виникають унаслідок неотримання прибутків від використання території для іншої діяльності (напр., сільськогосподарської чи туризму).

Якщо говорити про систему моніторингу геологічного середовища (ГС), то може йти про створення так званої постійно діючої прогностичної моделі Кривбасу, в основу якої мають бути покладені налагоджені системи моніторингу різних його складових, і яка оперативним буде попереджати про найбільш імовірні ризики його катастрофічних змін. Слід пам'ятати, що нерівномірність розміщення спостережуваних точок у межах регіону суттєво зменшує можливості одержання достовірних відомостей щодо стану якості ГС і попередження виникнення надзвичайних ситуацій чи своєчасну ліквідацію наслідків впливу гірничодобувних і переробних підприємств. Така прогностична модель має діяти в режимі реального часу і організована на основі географічної інформаційної системи (ГІС).

Необхідність оцінки ступеня екологічного навантаження, що обумовлює ризики для території, є одним із пріоритетних напрямів діяльності із завершення гірничодобувних робіт на родовищі. Завчасне прогнозування необхідних інвестиційних впливів у даного роду контролю значно спрощує подальше проведення робіт і збільшує імовірність упередження виникнення екологічних небезпек.

Створений прогноз щодо витрат на моніторинг двох типових об'єктів Кривбасу – ліцензійних площ Валявчинського родовища (кар'єр № 3) і кар'єру "Південний" по завершенню їхнього фактичного життєвого циклу базується на використанні середньозважуваної вартості моніторингу, що проводиться інвесторами на словацьких об'єктах – одному із родовищ залізничної площі Нижньої Слони та Руднянському рудному полі (Кошарна, 2019).

Розрахунок означеної величини включає різні обсяги витрат на перший рік моніторингу, що є найбільш повним та всеохоплюючим, через необхідність якомога більш точної оцінки стану довкілля після припинення гірничих робіт, та другий із усіма наступними роками, на кожен з яких виділяється близько 82% від суми, що витрачається на перший рік.

Безпосередній прогноз виконано для вітчизняних об'єктів через підрахунок інтерпольованих значень витрат на моніторинг, використовуючи середньозважувані вартості з урахуванням відсоткової різниці вкладень у той чи інший рік:

$$B_{int} = \bar{V} \times S_{поруш.}, \quad (1)$$

де B_{int} – інтерпольоване значення витрат на моніторинг площ вітчизняних родовищ; $\bar{V}$ – середньозважувана вартість; $S_{поруш.}$ – площі, порушені гірничими роботами та відвалами родовища/кар'єру.

Крім прогнозних вартостей на кожен рік моніторингу, було визначено і сумарне інтерпольоване значення витрат на п'ять років моніторингу порушених площ кожного з родовищ

$$B_{int} = \sum_{i=1}^5 B_{int} . \quad (2)$$

Результати проведених розрахунків подано в табл. 1.

Таблиця 1

**Результати підрахунку інтерпольованого значення витрат
на моніторинг площ Валявкинського родовища (кар'єр № 3) і кар'єру Південний**

Об'єкт	Інтерпольоване значення витрат на моніторинг площ					
	На перший рік моніторингу		На другий та кожен наступний рік моніторингу		Сумарне значення витрат на п'ять років моніторингу	
	€	грн	€	грн	€	грн
Валявкинське родовище	59 187,3	1 887 483	48 461	1 545 421,29	253 031,3	8 069 168,16
Кар'єр "Південний"	38 675,63	1 233 365,84	31 666,55	1 009 846,28	165 341,83	5 272 750,96

У загальних кошторисах на проведення всіх рекультивационних робіт і постліквідаційних досліджень екологічного спрямування історично відводиться від 10 до 15 % на моніторинг стану навколишнього середовища в межах площ, які зазнавали безпосереднього впливу від видобутку корисної копалини. Даний відсоток не є фіксованим, оскільки залежить від низки факторів, таких як: розміри площі, тривалість та інтенсивність негативного впливу родовища на прилеглі території, паралельна активність з порушення та відновлення складових навколишнього середовища, добросовісність користувачів надр та ін. Ілюстративним прикладом пропорційного співвідношення розмірів родовищ і витрат на контроль за станом прилеглих до нього територій є порівняння сумарних прогнозних витрат на п'ять років моніторингу на

криворізьких об'єктах і сум, що були витрачені за цей же період на словацьких, де більш суттєві суми фіксуються саме на вітчизняних об'єктах.

За відсутності чітко фіксованих у звітах підприємств передбачуваних екологічних витрат можливе створення прогнозного загального кошторису, використавши умовний показник в 11 % (відсоток обумовлений середніми розмірами родовищ відносно інших криворізьких об'єктів), що буде відводитися на проведення п'ятирічного моніторингу в переліку всіх рекультивационних робіт і постліквідаційних досліджень на Валявкинському родовищі (кар'єрі № 3) та кар'єрі "Південний". Таким чином, вираховується орієнтовна (можлива) сума всіх екологічних витрат (табл. 2), необхідна для повернення прилеглим до досліджуваних родовищ територіям первозданного вигляду.

Таблиця 2

**Орієнтовні (можливі) кошториси загальних екологічних витрат
на Валявкинському родовищі (кар'єр № 3) та Південному кар'єрі**

	Валявкинське родовище		Південний кар'єр	
	€	грн	€	грн.
Прогнозні загальні екологічні витрати	2 300 284,54	73 402 079,67	1 503 107,54	47 964 161,60

Ураховуючи факт реалізації більшої частини екологічно спрямованих заходів на досліджуваних родовищах паралельно до гірничодобувних робіт, фінальні суми компенсаційної діяльності по завершенню, консервації чи ліквідації родовищ можуть бути змінені в бік зменшення.

Робота із зазначеними сумами має кілька шляхів. Перший передбачає їхнє накопичення під час експлуатації родовища за рахунок прибутків від продажу сировини. Даний процес супроводжується відкриттям спеціального рахунку підприємства із заборобою витрачання накопичених засобів до початку ліквідації родовища. Накопичена сума має бути дисконтована на весь період розробки родовища і відповідати реальним майбутнім витратам на екологічну реабілітацію території.

Проте за результатами статистичного аналізу даних досліджуваних криворізьких родовищ і прогнозування екологічних витрат, що матимуть місце по завершенню їхньої добувної активності, можливо зробити висновок щодо доцільності проведення на гірничодобувних об'єктах активних робіт паралельної спрямованості відносно видобутку корисної копалини та рекультивационної діяльності. Даний підхід (рис. 1) дає можливість суттєво зменшувати об'єми капіталовкладень у постліквідаційний період родовищ, коли видобуток уже припинено, але є необхідність нівелювання усіх завданих навколишньому середовищу збитків. Так, за умови реалізації хоча б 65–70 % робіт, вартість яких фіксується в кошторисі екологічних витрат на родовищі, по завершенню гірничодобувної активності, необхідні об'єми капіталовкладень будуть суттєво нижчі тих, що матимуть місце на родовищах, де активне інвестування в екологічну складову мало місце в основному на етапі виснаження надр.

Крім того, проведення означених робіт з початку першої третини етапу інтенсивного використання надр так чи інакше сприяє сповільненню ускладнення гірничотехнічних умов, які формально виражаються у змінах не лише глибини відпрацювання родовищ, але й фізико-механічних властивостей самого масиву.

Узятий за основу алгоритм дій, що мав місце на словацьких сидеритових родовищах, можна вважати доцільним до використання для прогнозування попутних і постліквідаційних екологічних заходів і витрат на українських залізничних родовищах, що перебувають на стадії інтенсивного використання та виснаження.

На стадії пост-майнінгу (етапах інтенсивного використання і виснаження родовищ) важливим фактором є пристосування нормативно-правової бази діяльності підприємств гірничо-металургійного комплексу до нових умов. З одного боку, зміни в цій базі мають забезпечувати правильну геолого-економічну оцінку родовищ з максимальним урахуванням технічних і технологічних факторів їхньої експлуатації, геолого-екологічних ризиків, планування поточних екологічних витрат і передбачення наслідків їхньої розробки і відповідних компенсаційних витрат. З іншого боку, вони мають спонукати до накопичення фінансових ресурсів на ліквідацію родовищ і екологічну реабілітацію територій. Тобто метою цих змін має бути, по можливості, максимальна мінімізація впливу діяльності підприємства на довкілля під час його роботи і створення комфортних умов для життя людини й існування флори і фауни в природно-техногенному середовищі після його ліквідації. З цієї причини пошук шляхів забезпечення надрокористувачів найбільш якісною сировиною, а навколишнє середовище якомога меншими впливами від гірничодобувної діяльності є дуже актуальним, особливо в умовах таких гірничих районів, як Кривий Ріг.

Одним із таких шляхів може стати врахування залежності кількості та якості запасів від включення постліквідаційних витрат до техніко-економічних розрахунків. І як основний параметр у дослідженні доцільно використати мінімальний промисловий вміст корисного компонента як параметр кондицій, що застосовується з метою підрахунку балансових запасів.

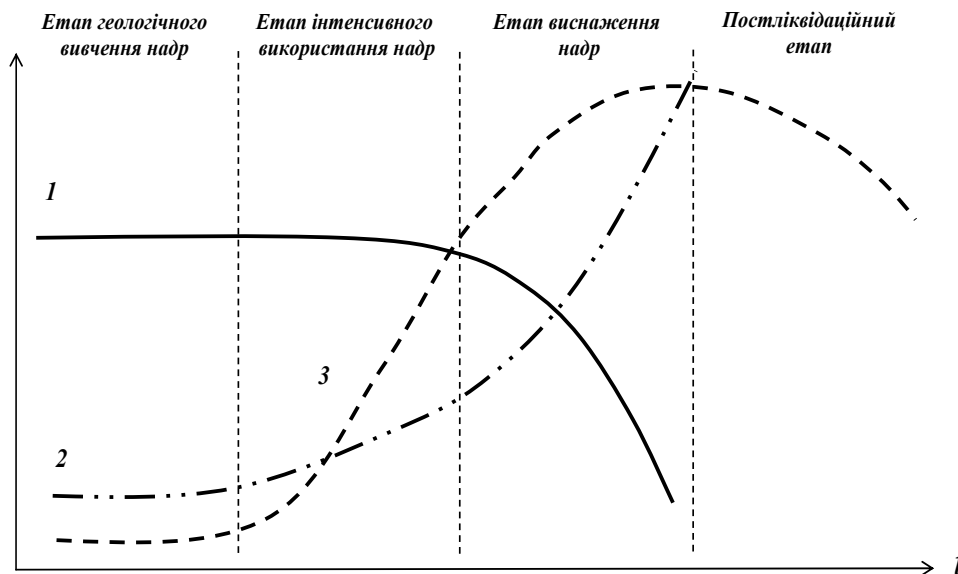


Рис. 1. Характерні зміни геологічних та еколого-економічних показників на родовищах за умови паралельної добувної та рекультиваційної діяльності (Кошарна, 2019):

1 – складність гірничотехнічних умов; 2 – поточні витрати; 3 – інвестування екологічної складової

По своїй суті, *мінімальний промисловий вміст корисного компонента* ($C_{\min}$) є вмістом корисного компонента, який забезпечує рівність витрат на видобуток корисної копалини і переробку товарної продукції та цінності корисного компонента, який при цьому вилучається. Цей показник визначає рівень беззбиткового видобутку та переробки і при цьому забезпечує найбільш тісний зв'язок гірничо-геологічних, технічних, технологічних і економічних характеристик родовища. І в стандартному випадку дана величина визначається таким чином:

$$C_{\min} = \frac{Z \times a}{C_{\text{руди}} \times (1 - p) \times K_{\text{вил}}} \times 100\%, \quad (3)$$

де Z – собівартість; a – вміст корисного компонента в товарній продукції; $C_{\text{руди}}$ – ціна товарної продукції; p – коефіцієнт розубожування (збіднення); $K_{\text{вил}}$ – коефіцієнт вилучення.

Структура ж собівартості у свою чергу обов'язково включає амортизаційні відрахування

$$A = \frac{K_t}{T_{\text{експл}}}, \quad (4)$$

де A – амортизація; K_t – капіталовкладення в постліквідаційні роботи та дослідження; $T_{\text{експл}}$ – експлуатаційні витрати.

Об'єктом для розрахунків був обраний кар'єр "Південний", для якого раніше був створений загальний прогнозний кошторис на проведення усіх постліквідаційних робіт і досліджень. Мінімальний промисловий вміст $Fe_{\text{зар}}$ було розраховано для двох варіантів вихідних даних:

- 1) за прогнозними показниками останньої геолого-економічної оцінки запасів багатих залізних руд 2013 р. – $C_{\min}$;
- 2) за прогнозними показниками з урахуванням додаткових капіталовкладень у постліквідаційні дослідження $C_{\min}$ відкориг.

За проведеними за фактичними, зазначеними у звітах гірничодобувними підприємствами, даними розрахунками, величина мінімального промислового вмісту корисного компонента сягає 46 %. І за встановленої ціни об'єми запасів руд повторної розробки будуть відповідати тим, що наведені у звітах при розрахунку цієї величини з використанням бортового вмісту $Fe_{\text{зар}} = 46\%$.

Урахування при визначенні мінімального промислового вмісту корисного компонента розрахованих раніше витрат на постліквідаційні роботи та дослідження обумовлює певні зміни його величини. Перш за все амортизаційні відрахування для кар'єру "Південний" на планові 14 років його можливої активності становитимуть 107364,8243 €/рік або ж 3 426 011,543 грн/рік. Тобто відкоригована собівартість формуватиметься за рахунок прийняття до уваги як цієї величини, так і введення інших, таких як: річна собівартість і річна продуктивність з видобутку, і в кінцевому результаті $C_{\min}$ відкориг. зростає до 51,42 %.

Як випливає із проведених розрахунків, нарощування витрат на постліквідаційні роботи та дослідження певною мірою спричиняє зростання собівартості і відповідно мінімального промислового вмісту корисного компонента. Ще одним фактором, який може вплинути на досліджувану величину ($C_{\min}$), стала ціна руди, що є достатньо динамічною величиною. За її певної величини, для прикладу 500 грн, суттєвих змін не відбувається і зазначений параметр не буде впливати на підрахунок запасів. Проте якщо ціна буде падати ефект буде зворотнім.

Так, маючи ціну руди, можливим є встановлення згаданої різниці шляхом перевірки даних по блоках, використавши один із запропонованих гірничодобувними підприємствами розрахунків об'єму запасів руд повторної розробки з найвищими з прогнозованих варіантів вмістами $Fe_{\text{зар}}$ (розрахунок був виконаний з урахуванням бортового вмісту $Fe_{\text{зар}} = 50,6\%$). За умови використання відкоригованого мінімального промислового вмісту корисного компонента (51,42 %) два блоки із дев'яти можуть бути відбраковані внаслідок менших за встановлену планку значень. Як результат із підрахованих запасів випадає 353,6 тис. т, але якість запасів дещо збільшується (табл. 3).

Проведений аналіз двох варіантів визначення балансових запасів, один з яких включав розраховані постліквідаційні витрати, доводить реальність запропонованого шляху забезпечення користувачів надр більш якісною сировиною, а навколишнього середовища – меншими впливами від гірничодобувної діяльності.

Таблиця 3

Зміни обсягів запасів руд повторної розробки при використанні відкоригованого мінімального промислового вмісту корисного компонента ($C_{\min}$ відкориг.)

№ блока	Запаси блока, тис. т	Вміст Fe _{заг} , %	Запаси блока, тис. т	Вміст Fe _{заг} , %
Розрахунок об'єму запасів руд повторної розробки при бортовому вмісті Fe _{ар} = 50,6 %			Розрахунок об'єму запасів руд повторної розробки з урахуванням відкоригованого C _{мін} = 51,42 %	
Категорія C ₁				
1	347,6	51,31	-----	-----
2	345,4	52,89	345,4	52,89
3	196,4	54,03	196,4	54,03
4	115,1	53,06	115,1	53,06
Усього по C ₁	1004,5	52,58	656,9	53,26
Категорія C ₂				
5	22,0	51,72	22,0	51,72
6	51,8	52,26	51,8	52,26
7	121,8	51,83	121,8	51,83
8	59,8	51,99	59,8	51,99
9	6,0	51,40	-----	-----
Усього по C ₂	261,4	51,93	255,4	51,95
Усього по родовищу:	1265,9	52,45	912,3	52,89

Напрями забезпечення сталого розвитку Кривбасу та підходи до екологічної реабілітації його території. У регіональних аспектах мінерально-сировинна база (МСБ) країни має відповідати не лише загальнодержавним напрямкам, а також забезпечувати збалансовану структуру і раціональність використання надр у межах окремих областей, районів. Важливим напрямом, з точки зору раціонального використання надр, є комплексне освоєння родовищ. Висновки щодо комплексного освоєння залізрудних родовищ Кривбасу зводяться до такого (*Плотніков та Курило, 2018*):

1. Характеристики освоєння залізрудних родовищ Кривбасу свідчать про великі можливості комплексного освоєння надр, які базуються на найбільш повному і раціональному використанні наявних ресурсів у межах певної ділянки надр. У першу чергу це стосується супутнього використання нерудної сировини (будівельних матеріалів) її розробки відходів гірничо-збагачувального виробництва.

2. Доцільність і раціональність певних видів комплексного освоєння надр визначається за результатами геолого-економічної оцінки, яку проводять з урахуванням раціонального використання інших видів природного середовища.

3. Комплексне використання мінеральних ресурсів на початкових етапах (у 1970–1980-х рр.) поліпшувало техніко-економічні показники роботи гірничодобувних підприємств в основному за рахунок збільшення об'єму виробництва та номенклатури товарної продукції.

4. В умовах сучасних ринкових відносин господарювання, промислове значення об'єктів користування надрами, у тому числі й техногенних родовищ, визначається не тільки якісними і кількісними, але й вартісними характеристиками запасів корисних копалин.

Промислове значення техногенних об'єктів має визначатися з урахуванням усіх екологічних, гірничотехнічних, технологічних та екологічних критеріїв і раціонального використання інших складових природного середовища, у тому числі:

- вартості запасів природних і техногенних родовищ, що залежить від кон'юнктури ринку даної мінеральної сировини, зокрема, наявності попиту на продукцію даної якості;
- екологічних наслідків використання не тільки надр, але й земель та інших складових довкілля;
- економічної ефективності розробки основної корисної копалини родовища (основного виробництва гірничого підприємства);
- наявності технічних і технологічних рішень для ефективного освоєння сировини.

Велике значення в забезпеченні розвитку залізрудних регіонів мають рециклінг сировини і переробка відходів. Сталь переробляється на 100 %, це означає, що її можна повторно переробляти в один і той же матеріал з такою ж якістю знову і знову. Розрахунки показують, що при її рециклінгу відбувається значна економія енергії та сировини (більше 1400 кг залізної руди, 740 кг коксівного вугілля та 120 кг вапняку зберігаються для кожної тонни сталевого лому, перетвореного в нову сталь) (*Minerals and Metals, 2016*). Прогнозується, що світовий ринок металобрухту найближчі роки перевищить 800 млн т унаслідок зростання попиту на сталь і більш широкого використання електродугових печей у виробництві сталі. У Кривому Розі вченими успішно розроблено і реалізується інноваційна технологія безвідходної переробки техногенної сировини (окалина прокатних металургійних станів, металургійних шлаків, шлаків збагачення руд і будь-яких відходів і річкового осаду, що містять рудні мінерали), яка базується на досягненнях фізики твердого тіла і наномінералогії. Процеси реалізуються у вихровому повітряно-мінеральному потоці й супроводжуються глибокою трансформацією морфології й властивостей мінеральних часток сировини, що переробляється (*Довгий та ін., 2017, 2019*). На виході отримуються рудні концентрати і нерудні продукти широкого використання.

Перспективним напрямком, що забезпечує безвідходне виробництво продукції, є порошкова металургія, яка охоплює виробництво металевих порошків, а також виробів з них або їхніх сумішей з неметалевими порошками (*Порошкова металургія, н.д.*). Серед наявних різноманітних способів обробки металів вона займає своє особливе місце, оскільки дозволяє не тільки робити вироби різних форм і призначень, але й створювати принципово нові матеріали, одержати які іншими шляхом украй важко або взагалі неможливо. Порошкова металургія успішно конкурує з литтям, обробкою тиском, різанням та іншими методами, доповнюючи або замінюючи їх. Вона застосовується в металообробці на заміну технологій обробки різанням з досягненням значного зниження (у 3–5 разів) показників витрат металів, собівартості виробів і підвищення у 1,5–2 рази продуктивності праці. Завдяки структурним особливостям продукти порошкової металургії більш термостійкі, краще переносять дію циклічних коливань температури і напруги, а також ядерного опромінювання, що дуже важливо для матеріалів нової техніки. Але в Україні поки що слабо розвиваються немоєнні способи виробництва чорних металів, які є екологічно чистими, а саме електрометалургія і порошкова металургія. У безпосередній близькості до Криворізького басейну – у Правобережному зроблено прогнозу

оцінку запасів і ресурсів магнетитових залізистих кварцитів, придатних для порошкової металургії (*Глотников і Курило, 2010*). Річ тільки в організації й поширенні виробництв, що її застосовують.

На етапі інтенсивного використання і виснаження родовищ, на якому перебуває Кривбас, важливим є пристосування нормативно-правової бази діяльності підприємств гірничо-металургійного комплексу до нових умов. З одного боку, зміни в цій базі мають забезпечувати правильну геолого-економічну оцінку родовищ з максимальним урахуванням технічних і технологічних факторів їхньої експлуатації й геолого-екологічних ризиків, плануванням поточних екологічних витрат і передбаченням наслідків їхньої розробки і відповідних компенсаційних витрат. З іншого боку, такі зміни мають бути спрямовані на накопичення фінансових ресурсів на ліквідацію родовищ та екологічну реабілітацію територій.

Усі технологічні інноваційні рішення так чи інакше впливають на соціально-політичну складову сталого розвитку регіону, що відображаються у комплексі соціальних проблем. Кількість робочих місць на підприємствах та її зміни із введенням нових технологій чи в разі закриття нерентабельних підприємств, заробітна плата та соціальний захист працівників, створення нових робочих місць і працевлаштування звільнених працівників, травматизм і загибель шахтарів тощо мають передбачатися і бути відображені в цифрах державної статистики. Особливо це важливо для розробки масштабної довгострокової програми реструктуризації залізорудної промисловості Кривбасу.

Довготривала експлуатація родовищ і переробки залізних руд басейну мають катастрофічний вплив на навколишнє природне середовище і викликає критичні порушення породного масиву, порушення режиму та забруднення поверхневих і підземних вод, забруднення повітря і ґрунтів. Повністю компенсувати екологічні й економічні збитки в Кривбасі неможливо не лише тому, що на практиці неможливо відновити на території використання надр біоценози, які тут були до розробки родовищ. Також неможливо відновити рельєф, геохімічні й гідрологічні умови та багато іншого. Крім того, при спробі приведення території до початкового стану витрати на їхню екологічну реабілітацію зростають настільки, що втрачаються економічні стимули роботи гірничодобувних і переробних підприємств. Стає очевидним, що треба по можливості максимально мінімізувати вплив на довкілля діяльності підприємств під час їхньої роботи і створити комфортні умови для життя людини та існування флори і фауни в природно-техногенному середовищі після їхньої ліквідації (*Довгий та ін., 2017*).

І.М. Малахов (*Коржнев та Малахов, 2012*) свого часу звернув увагу на можливість використання одного інструмента для ринкового управління процесами техногенезу в геологічному середовищі, який дозволить не тільки залучити додаткові фінансові ресурси на екологічну реабілітацію територій, а й поступово позбавитись від відходів гірничо-металургійного комплексу і повернути заняті ними землі в господарське використання. Мета платежу за використання ресурсу, згідно з І.М. Малаховим, має бути протилежною до тієї, яка існує в природній системі. У природній системі підприємство платить за використання ресурсу. У техногенній екосистемі платити треба навпаки за невикористання техногенних ресурсів – штучних елементів рельєфу, створених у результаті гірничодобувної діяльності. Методику такої плати треба розробити, а саму плату ввести.

Необхідним є наукове обґрунтування і введення в нормативно правову базу проведення гірничих робіт плату за асиміляційний потенціал територій використання

надр, яка вже існує в деяких країнах. Накопичення екологічного збитку території починається ще на етапі її геологічного вивчення і триває під час усього періоду експлуатації родовища. Частина цього збитку гаситься (компенсується) за рахунок асиміляційного потенціалу території, а частина за рахунок поточних витрат на екологічну реабілітацію, передбачених розділом проекту робіт "Оцінка впливу на довкілля". У разі введення плати за асиміляційний потенціал вона повинна концентруватися на екологічних статтях державного бюджету і витрачатися у вигляді дотацій на екологічну реабілітацію територій.

Фінансові ресурси на екологічну реабілітацію, що супроводжують ліквідацію родовища, реально можна зібрати тільки під час його експлуатації за рахунок прибутку від продажу сировини. Для цього доцільно відкрити спеціальний рахунок підприємства. Сума накопичених на цьому рахунку коштів має бути дисконтована на весь період розробки родовища і відповідати реальним майбутнім витратам на екологічну реабілітацію території зі створенням комфортних умов для життя людини та існування флори і фауни. Для цього й потрібна геолого-економічна оцінка (ГЕО) майбутнього екологічного збитку, накопиченого на етапах геологічного вивчення й експлуатації родовища. Розрахунок відрахувань на згаданий вище спеціальний рахунок має проводитися за детальної ГЕО перед початком будівництва гірничодобувного підприємства, коли визначаються показники економічної ефективності й доцільності його проектування і будівництва. Потім сума цих відрахувань буде уточнюватися і коригуватися на етапах інтенсивної експлуатації й виснаження родовища (*Кошарна, 2019*).

Крім того, серед основних напрямів поліпшення екологічної ситуації в районах діяльності підприємств гірничо-металургійного комплексу треба відмітити економічну доцільність поступового зміщення акцентів металургійних комбінатів з використання продуктів переробки залізних руд на металобрухт, а переробних підприємств – на переробку відходів.

Вивчення розподілу важких металів на техногенних об'єктах гірничозбагачувальних комбінатів Кривого Рогу підтвердило висновок інших дослідників про те, що основним джерелом надходження важких металів у ґрунти в Кривому Розі є шлаки і дими металургійних підприємств (*Довгий та ін., 2017*). Таким джерелом не можуть бути шлами переробних підприємств унаслідок низького вмісту елементів-домішок у породах залізисто-кремєневих формацій. Практичним кроком до зменшення забруднення територій видобутку і переробки залізних руд важкими металами є рекомендація підприємствам, які переробляють вторинну металургійну сировину, відмовитись від існуючої надзвичайно шкідливої практики циклічного (багаторазового) її залучення до переробки. Більш ефективною й екологічно безпечною є одноразова переробка такої сировини з максимальним вилученням залізовмісних мінералів і повним використанням відходів збагачення в будівельній та інших галузях народного господарства (*Довгий та ін., 2019*).

Крім зазначеного вище, у Кривому Розі необхідно активно запроваджувати різноманітні екологічні програми від державного до місцевого рівня із чітким розподілом фінансування заходів, спрямованих на охорону та відновлення окремих складових геологічного середовища (*Кошарна, 2019*). Процеси децентралізації зі зростанням наповнення місцевих бюджетів сприяють цьому. Будь-які програми екологічної реабілітації повинні спиратися на постійно діючу прогнозу модель геологічного середовища Кривбасу, в основу якої мають бути покладені налагоджені системи моніторингу різних його складових

(гідрогеологічної, інженерно-геологічної, сейсмічної, забруднення ґрунтів і поверхневих водойм та ін.). При створенні й функціонуванні такої моделі фінансові ресурси будуть розподілятися більш раціонально на попередження і розв'язання конкретних екологічних проблем, які можуть виникати у випадку реалізації розрахованих у такій моделі найбільших екологічних ризиків.

Висновки. Розвиток України як сировинної держави обумовив високий ступінь виснаження окремих природних ресурсів і переобтяженість економіки важкими галузями виробництва. Ресурсо- та енергоємність застарілих технологій початку минулого століття, які використовуються у вітчизняній промисловості, призвели до важких екологічних наслідків, критичних порушень довкілля і балансу біосфери, особливо в межах розвинутих пост-майнінгових територій, найбільш типовим представником яких є територія Криворізького залізрудного басейну. Вона добре вивчена в геологічному, ресурсному, економічному та екологічному відношенні. Треба скласти стратегію і чітку програму її подальшого сталого (збалансованого) розвитку як пост-майнінгової території з урахуванням досвіду інших країн. Зрозуміло, що така програма має бути ґрунтована на даних екологічного моніторингу всіх складових геологічного середовища. З урахуванням досвіду зарубіжних країн необхідно розробити і на законодавчому рівні закріпити механізми реалізації програм сталого розвитку окремих пост-майнінгових територій України залежно від їхніх індивідуальних економічних, екологічних і соціальних умов.

Список використаних джерел

- Амоша, О.І., Булев, І.П., Землянін, А.І. та ін. (2017). Промисловість України – 2016: стан та перспективи розвитку. Ін-т економіки промисловості.
- Довгий, С.О., Коржнев, М.М., Трофимчук, О.М. та ін. (2017). Геологічна будова та сучасні геолого-економічні й екологічні умови видобутку і переробки залізних руд Криворізько-Кременчуцької зони. К.: Ніка-Центр.
- Довгий, С.О., Трофимчук, О.М., Яковлев, Є.О. та ін. (2019). Стратегічні напрями реструктуризації Донецького вугільного і Криворізького залізрудного басейнів в умовах трансформації енергетичної сфери. К.: Ніка-Центр.
- Довгий, С.О., Шестопалов, В.М., Коржнев, М.М. та ін. (2007). Реструктуризація мінерально-сировинної бази України та її інформаційне забезпечення. К.: Наук. думка.
- Коржнев, М.М., Малахов, І.М. (2012). Техногенні форми рельєфу та оцінка екологічних ризиків і збитків гірничодобувної діяльності у Криворізькому залізрудному басейні. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 58, 46–50.
- Кошарна, С.К. (2019). Геолого-економічна оцінка залізрудних родовищ Криворізького басейну на етапі інтенсивного використання і виснаження запасів: автореф. дис. ... канд. геол. наук: 04.00.19. Київ.
- Мищенко, В.С. (1998). Екоресурсні платежі в Україні. *Економіка України*, 10, 40–46.
- Плотников, А.В., Курило, М.М. (2010). Прогнозная оценка запасов и ресурсов Правобережного района Украинского щита – наиболее перспективной сырьевой базы для каустической металлургии. *Горная промышленность, Спецвыпуск*, 42–47.
- Плотников, О.В., Курило, М.М. (2018). Геолого-економічні чинники промислового значення супутніх корисних копалин залізрудних родовищ Кривбасу. *V міжнар. наук.-практ. конф. "Надрокористування в Україні. перспективи інвестування"*, 8-12 жовт. 2018 р., Трускавець, 1, 261–265.
- Порошкова металургія. (н.д.). Отримано 27 січня 2020, із <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
- Рудько, Г.І., Яковлев, Є.О. (2018). Регіональні техногенні зміни еколого-геодинамічних умов розробки залізрудних родовищ Кривбасу. *Мінеральні ресурси України*, 2, 43–50.
- Batterham, R. (2014). Lessons in sustainability from the mining industry. *2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry "SYMPHOS 2013"*. *Procedia Engineering*, 83(2014), 8–15.
- Chen, K.H. (2018). Research of mining wasteland reclamation and regeneration modes in Shendong Mining Region. *4th International Conference on Agricultural and Biological Sciences, Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 185, 14. doi:10.1088/1755-1315/185/1/012027.
- Cojean, R., Franco, N., Lazarewicz, J.-C. et al. (2005). The post-mining context at Decazeville-Firmin concession (Aveyron, France): analysis of impacts resulting from the cessation of pumping at the central shaft. Survey of various scenarios related to the water level of the Pit lake in the Grande Decouverte. *Post mining Symposium, Nov 2005, Nancy, France*. Retrieved January 25, 2020, from <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972519>
- Cotula, L., Mouan, C. (2018). Special economic zones: engines of development or sites of exploitation? Retrieved January 20, 2020, from <http://pubs.iied.org/17481IIED>
- Fagiewicz, K., Mękarski, M. (2018). Ecological and social aspects in the management of post-mining areas. An example of the Adamów lignite basin. *Civil and environmental engineering reports*, 28 (3), 50–64. doi: 10.2478/ceer-2018-0034
- Heymann, E., Vetter, S. (2013). Europe's re-industrialization. The gulf between aspiration and reality. Frankfurt am Main: Deutsche Bank AG, DB Research, 2.
- Kokko, K., Buanes, A., Koivurova, T. et al. (2015). Sustainable mining, local communities and environmental regulation. *Barents Studies: Peoples, Economies and Politics*, 2, 50–81.
- Kretschmann, J., Efremenkova, A., Khoreshok, A. (2017). From Mining to Post-Mining: The Sustainable Development Strategy of the German Hard Coal Mining Industry. Ecology and safety in the technosphere: current problems and solutions. *Earth and Environmental Science*, 50, 9. doi:10.1088/1755-1315/50/1/012024
- Mehta, P.S. (2002). The Indian Mining Sector: Effects on the Environment & FDI Inflows. *CCNM global forum on international investment and the Environment: Lessons to be learned from the Mining Sector, 7-8 February, Paris, France*.
- Minerals and Metals Fact Book. (2016). Natural Resources Canada.
- Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD). (n.d.). Retrieved January 24, 2020, from <https://www.iied.org/mining-minerals-sustainable-development-mmsd>.
- Sardinha, I., Carolino, J., Mendes, I., Verga Matos, P. (2010). The rehmine research project: the threefold value of São Domingos abandoned mine rehabilitation in southern Portugal. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 141, 28–38. WIT Press: ISSN 1743-3541. Retrieved January 18, 2020, from www.witpress.com. doi:10.2495/BF100031,
- Sklenicka, P., Prikryl, I., Svoboda, I., Lhota, T. (2004). Non-productive principles of landscape rehabilitation after long-term opencast mining in north-west Bohemia. *Journal of The South African institute of Mining and Metallurgy*, 83–88.

References

- Amosha, O., Bulieiev, I., Zemliankin, A. et al. (2017). Ukrainian Industry - 2016: state and prospects of development. Institute of Industrial Economics. [in Ukrainian]
- Batterham, R. (2014). Lessons in sustainability from the mining industry. *2nd International Symposium on Innovation and Technology in the Phosphate Industry "SYMPHOS 2013"*. *Procedia Engineering*, 83 (2014), 8–15.
- Chen K.H. (2018). Research of mining wasteland reclamation and regeneration modes in Shendong Mining Region. *4th International Conference on Agricultural and Biological Sciences, Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 185, 14. doi:10.1088/1755-1315/185/1/012027.
- Cojean, R., Franco, N., Lazarewicz, J.-C. et al. (2005). The post-mining context at Decazeville-Firmin concession (Aveyron, France): analysis of impacts resulting from the cessation of pumping at the central shaft. Survey of various scenarios related to the water level of the Pit lake in the Grande Decouverte. *Post mining Symposium, Nov 2005, Nancy, France*. Retrieved January 25, 2020, from <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00972519>.
- Cotula, L., Mouan, C. (2018). Special economic zones: engines of development or sites of exploitation? *IIED Briefing*. Retrieved January 20, 2020, from <http://pubs.iied.org/17481IIED>.
- Dovhyi, S., Korzhnev, M., Trofymchuk, O. et al. (2017). Geological structure and modern geological, economic and ecological conditions of extraction and processing of iron ores of Kryvyi Rih-Kremenchug zone. [in Ukrainian]
- Dovhyi, S., Shestopalov, V., Korzhnev, M. et al. (2007). Restructuring of the Ukrainian Mineral and raw materials Base and its information provision. Kyiv. [in Ukrainian].
- Dovhyi, S., Trofymchuk, O., Yakovlev, E. et al. (2019). Strategic directions of restructuring of Donetsk coal and Kryvyi Rih iron ore basins in the conditions of transformations of energy sphere. Kyiv. [in Ukrainian].
- Fagiewicz, K., Mękarski, M. (2018). Ecological and social aspects in the management of post-mining areas. An example of the Adamów lignite basin. *Civil and environmental engineering reports*, 28 (3), 50–64. doi: 10.2478/ceer-2018-0034.
- Heymann, E., Vetter, S. (2013). Europe's re-industrialization. The gulf between aspiration and reality. Frankfurt am Main: Deutsche Bank AG, DB Research, 2.
- Kokko, K., Buanes, A., Koivurova, T. et al. (2015). Sustainable mining, local communities and environmental regulation. *Barents Studies: Peoples, Economies and Politics*, 2, 50–81.
- Korzhnev, M., Malakhov, I. (2012). Technogenic landforms and estimation of ecological risks and losses of mining activities in Kryvyi Rih iron ore basin. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 58, 46–50. [in Ukrainian]
- Kosharna, S. (2019). Geological and economic estimation of iron-ore deposits of the Kryvyi Rih basin on the stage of the intensive use and exhaustion of reserves. *Extended abstract of Candidate's thesis (Economic geology)*. Kyiv. [in Ukrainian]
- Kretschmann, J., Efremenkova, A., Khoreshok, A. (2017). From Mining to Post-Mining: The Sustainable Development Strategy of the German Hard Coal Mining Industry. Ecology and safety in the technosphere: current problems and solutions. *Earth and Environmental Science*, 50, 9. doi:10.1088/1755-1315/50/1/012024
- Mehta, P.S. (2002). The Indian Mining Sector: Effects on the Environment & FDI Inflows. *CCNM global forum on international investment and the Environment: Lessons to be learned from the Mining Sector, 7-8 February, Paris, France*.
- Minerals and Metals Fact Book. (2016). Natural Resources Canada.

Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD). (n.d.). International Institute for Environment and Development. Retrieved January 24, 2020, from <https://www.iied.org/mining-minerals-sustainable-development-mmsd>

Mishchenko, V. (1998). Eco-Resource Payments in Ukraine. *Economy of Ukraine*, 10, 40–46. [in Ukrainian]

Plotnikov, A., Kurylo, M. (2010). Predictive estimation of the the reserves and resources of the Right-Bank District of the Ukrainian Shield - the most promising raw material base for qualitative metallurgy. *Mining*, Special issue, 42–47. [in Ukrainian]

Plotnikov, A., Kurylo, M. (2018). Geological and economic factors of industrial value of associated minerals of Kryvbas iron ore deposits. *Conf. Subsurface use in Ukraine: prospects for investing, Truskavets, 8-12 October, 2018*, 1, 261–265. [in Ukrainian]

Powder metallurgy. (n.d.). Retrieved January 25, 2020, from <https://uk.wikipedia.org/wiki/> [in Ukrainian]

M. Korzhnev, Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof.,
E-mail: mnkorzhnev@google.com;
Institute of Telecommunications and Global Information Space,
13 Chokolivsky Ave., Kyiv, 03386, Ukraine;
M. Kurilo, PhD (Geol.), Assoc. Prof.,
E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua;
S. Kosharna, PhD (Geol.), E-mail: sofiia.kosharna@ukr.net;
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Institute of Geology,
90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

Rudko, G., Yakovliev, E. (2018). Regional technogenic changes of ecological-geodynamic conditions of Kryvbas iron ore deposits development. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 43-50. [in Ukrainian]

Sardinha, I., Carolino, J., Mendes, I., Verga Matos, P. (2010). The rehmine research project: the threefold value of São Domingos abandoned mine rehabilitation in southern Portugal. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 141, 28-38., WIT Press: ISSN 1743-3541. Retrieved January 18, 2020, from www.witpress.com. doi:10.2495/BF100031

Sklenicka, P., Prikryl, I., Svoboda, I., Lhota, T. (2004). Non-productive principles of landscape rehabilitation after long-term opencast mining in north-west Bohemia. *Journal of The South African institute of Mining and Metallurgy*, 83-88.

Надійшла до редколегії 07.09.2020

APPROACHES TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE KRYVYI RIH IRON ORE BASIN PLANNING AT THE POST-MINING STAGE

Environmental problems in Ukraine's post-mining territories critically worsen the living conditions of the population and do not contribute to the country's growth under conditions of sustainable development. The programs of their ecological rehabilitation and further development should be individual, taking into account the specificity of the territories. The list of criteria that affect the specificity of risk assessment in the Kryvyi Rih basin can be supplemented with the atypical landscape, which is expressed in the forms of man-made relief and creates conditions for activation of exogenous geological processes. Any environmental rehabilitation programs should be based on a permanent forecast model of the Kryvbas geological environment, which should be based on well-established monitoring systems of its various components (hydrogeological, geological engineering, seismic, soil and surface water pollution and others). With the establishment and operation of such model, financial resources will be more rationally allocated to prevent and solve specific environmental problems that may arise in case the highest calculated in this model environmental risks are realized. The created forecast of monitoring costs for typical Kryvbas post-mining objects at the end of their actual life cycle is based on the use of monitoring (done by investors on Slovak sites) weighted average cost. Also for the Kryvyi Rih objects two variants of balance reserves determination were analyzed. One of them, which included calculated post-liquidation expenses, proves the reality of the proposed way of providing subsurface users with better quality raw materials, and the environment - with less impacts from mining.

The purpose of the study is to identify the main approaches to the planning process of the Kryvyi Rih basin sustainable development at the post-mining stage. The directions of ensuring Kryvbas sustainable development and approaches to ecological rehabilitation of its territory were also contemplated.

Keywords: territories of post-mining, environmental monitoring, environmental risks, permanent forecasting model of the geological environment, directions of ensuring Kryvbas sustainable development, environmental rehabilitation programs.

М. Коржнев, д-р геол.-минералог. наук, проф.,
E-mail: mnkorzhnev@gmail.com;
Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства,
бул. Чоколовский, 13, г. Киев, 03386, Украина;
М. Курило, канд. геол. наук, доц.,
E-mail: kurilo@mail.univ.kiev.ua;
С Кошарна, канд. геол. наук,
E-mail: sofiia.kosharna@ukr.net;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

ПОДХОДЫ К ПЛАНИРОВАНИЮ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ КРИВОРОЖСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО БАСЕЙНА НА СТАДИИ ПОСТ-МАЙНИНГА

Проблемы окружающей среды на территориях пост-майнинга Украины критически ухудшают условия жизнедеятельности населения и не способствуют росту страны на условиях устойчивого развития. Программы их экологической реабилитации и дальнейшего развития должны быть индивидуальными, с учетом специфики территорий. В перечень критериев, влияющих на специфику оценки рисков в Криворожском бассейне, можно отнести атипичность ландшафта, которая выражена в формах техногенного рельефа и создает условия для активизации экзогенных геологических процессов. Любые программы экологической реабилитации должны опираться на постоянно действующую прогнозную модель геологической среды Кривбасса, в основу которой должны быть положены налаженные системы мониторинга различных его составляющих (гидрогеологической, инженерно-геологической, сейсмической, загрязнения почвы и поверхностных водоемов и других). При создании и функционировании такой модели финансовые ресурсы будут распределяться более рационально на предупреждение и решение конкретных экологических проблем, которые могут возникать в случае реализации рассчитанных в такой модели крупнейших экологических рисков. Сделанный прогноз расходов на мониторинг для типичных объектов пост-майнинга Кривбасса по завершению их фактического жизненного цикла базируется на использовании средневзвешенной стоимости мониторинга, проводимого инвесторами на словацких объектах. Проведенный для криворожских объектов анализ двух вариантов определения балансовых запасов, один из которых включал рассчитанные постликвидационные расходы, доказывает реальность предложенного пути обеспечения пользователей недр более качественным сырьем, а окружающую среду – меньшими воздействиями от горнодобывающей деятельности.

Целью исследования является определение основных подходов к планированию устойчивого развития Криворожского бассейна на стадии пост-майнинга. Намечены направления обеспечения устойчивого развития Кривбасса и подходы к экологической реабилитации его территории.

Ключевые слова: территории пост-майнинга, экологический мониторинг, экологические риски, постоянно действующая прогнозная модель геологической среды, направления обеспечения устойчивого развития Кривбасса, программы экологической реабилитации.

УДК 553.98(262.81)

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.12>

С. Алиева, канд. геол.-минералог. наук, доц.,

E-mail: suaza@mail.ru;

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
пр. Азадлыг, 34, Баку, Азербайджан

МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ЛИТОЛОГО-ФАЦИАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛУБОКО ПОГРУЖЕННЫХ ПЕРСПЕКТИВНО-НЕФТЕГАЗОНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

*(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)**Настоящие исследования ставили своей задачей выяснение потенциальной нефтегазоносности глубокопогруженных и не изученных бурением отложений нижнего миоцена – палеогена в пределах Южно-Каспийской впадины (ЮКВ).**С этой целью была произведена прогнозная оценка формационной характеристики глубокопогруженных образований нижнего миоцена – палеогена западной бортовой зоны Южно-Каспийской мегавпадины (в основном Нижнекуринской нефтегазоносной области) в связи с перспективами нефтегазоносности. Помимо этого, были использованы результаты исследований выбросов грязевых вулканов, расположенных в рассматриваемой зоне (Нижнекуринской впадины и сопредельные зоны шельфа Южного Каспия).**В результате изучения данных бурения в сопредельных районах Кобыстан-Шемахинского, Предтапышского и Евлах-Агдабединского прогибов были получены данные о формационной характеристике, слагающих эту зону нижнемиоцен-палеогеновых отложений.**К наиболее перспективным площадям для проведения предварительного этапа поисковых работ на нефть и газ (на нижне-миоцен-палеогеновый комплекс) западного борта ЮКВ, по совокупности литолого-фациальных и тектонических критериев нефтегазоносности можно отнести следующие площади: Дуванный, Кянизадаг, Сангачал-Хара Зыря, Котурдаг, Дашгиль, Хамамдаг, Агзыбир, Кюрсангя.**Ключевые слова: нижний миоцен, Евлах-Агдабединский прогиб, формационная характеристика, Дуванный, Кянизадаг, Сангачал-Хара Зыря, Котурдаг, Дашгиль, Хамамдаг, Агзыбир, Кюрсангя.*

Постановка проблемы. Для прогноза нефтегазоносности глубокопогруженных и не изученных бурением отложений в крупных перспективно-нефтегазоносных регионах необходимы, кроме данных о строении таких отложений, которые могут быть получены геофизическими методами исследований, также и прогнозные данные о литолого-фациальной характеристике этих отложений. Такие прогнозные данные могут быть получены путём сравнительного анализа исследуемого региона с регионом, сходным по геологическому строению и развитию, где эти отложения уже изучены бурением и доказана их промышленная нефтегазоносность (Алиева и др., 2014).

Существенную помощь в деле исследования литолого-формационной характеристики глубокопогруженных перспективно-нефтегазоносных отложений могут оказать сейсмостратиграфические исследования временных разрезов, однако лишь в том случае, если исходный сейсмический материал имеет высокое качество, что весьма редко наблюдается в регионах со сложным геологическим строением.

По ряду крупных и весьма слабо изученных регионов, как например, Центрально-Южно-Каспийская перспективно-нефтегазоносная область (ПНО), интересные данные о предполагаемых мощностях крупных стратиграфических образований были получены по результатам анализа палеоструктурных построений, основанных на данных глубинного сейсмозондирования этого региона (Керимов и др., n.d.).

В работе (Алиева и др., 2014) нами была проведена прогнозная оценка формационной характеристики глубокопогруженных образований нижнего миоцена – палеогена западной бортовой зоны Южно-Каспийской мегавпадины (в основном, Нижнекуринской нефтегазоносной области (НГО)) в связи с перспективами нефтегазоносности.

Анализ последних исследований и публикаций. Существует множество научных работ, посвященных особенностям геологического строения майкопской серии в пределах нефтегазоносных районов Азербайджана и в сопредельных районах Восточного и Западного Предкавказья (Авербух и Альшейбани, 1993; Авербух, 1993; Баженова и др. 2002; Выжва и др., 2017; Guliyev et al., 2001; Михайлов и Загнитко, 2017; Михайлов, 2018 и др).

Осадочный комплекс на территории Азербайджана сложен рядом стратиграфических комплексов, которые представлены глинистыми плотными, плохо проницаемыми породами. К одному из таких комплексов относятся породы майкопской серии, считающиеся нефтематеринскими для вышележащей продуктивной толщи Азербайджана. Литологически отложения майкопа представлены толщей темно-серых, бурых, зачастую сланцевых, некарбонатных глин, слабо фаунистически охарактеризованных (Эфендиева и Гулиев, 2013).

Отложения нижнего миоцена – палеогена, как в пределах нефтегазоносных районов Азербайджана, так и в сопредельных районах Восточного и Западного Предкавказья, известны в качестве регионально-нефтегазоносного комплекса, с которым связаны значительные местоскопления УВ (Мурадханлы, Зардоб, Тарсдалляр, Гедакбоз, Нафталан, Умбаки, Сианская моноклинали и др. – в Азербайджане; Ачи-су, Избербаш, Инче-море, Берикей, Дузлак, Хошмензил, Шамхал-Булак и др. – в Дагестане; Абинское, Украинское, Азовское, Новодмитриевское, Хадыженское и др. – в Западном Предкавказье) (Керимов и Авербух, 1982).

Олигоцен-миоценовая майкопская серия широко распространена, также во всех регионах южного обрамления Восточноевропейской платформы, в том числе в пределах Черноморско-Крымского палеобассейна, где, как считается, она имеет важное газонефтегенерирующее значение. В литологической структуре майкопской серии преобладают глинистые разности с прослоями алевролитов и песчаников (Михайлов, 2017; Петриченко, 2000, 2001).

По мнению исследователей установлено, что в Южно-Каспийском бассейне отложения палеоген-миоценового комплекса (мощностью 2,5–5 км) на глубине до 0,2 км прошли стадию диагенеза; на глубине 0,2–1,8 км – протокатагенеза (ПК1 – ПК3); 1,8–2,7 км – мезокатагенеза (МК1); 7–6,1 км – МК2; 4–7,6 км – МК3; 5,3–9 км – МК4 – АК2; 10,4–11 км – АК3 (Керимов и др., n.d.). Современное состояние комплекса в зависимости от глубины его залегания и геотемпературных условий характеризуется генерацией нефти, конденсата, жирного газа и частично позднекатагенетического метана, т.е. продуцированием

всех видов и фаз УВ. Считается, что мезозойский комплекс (мощность 4,5–11 км, температура кровли-подошвы 167–424 °С) является генератором, главным образом, высокотемпературного метана, CO₂ и азота; палеоген-миоценовый (2,5–5,0 км, 76–237 °С) – нефти, жирного газа, конденсата и частично позднекатагенетического метана; плиоцен-антропогеновый – раннекатагенетического метана и относительно небольших объемов нефти ранней генерации (Михайлов, 2018).

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В пределах западной бортовой зоны Южно-Каспийской мегавпадины (Южно-Каспийская нефтегазоносная провинция (НГП)), охватывающей Гобустан-Апшеронскую и Нижнекуринскую НГО, где в настоящее время основным эксплуатационным нефтегазоносным комплексом являются отложения продуктивной толщи (ПТ), отложения нижнего миоцена – палеогена залегают на значительных глубинах (от 4000 до 7000 м) и поэтому сейчас не рассматриваются в качестве первоочередного объекта для поисковых работ на нефть и газ. Однако неизбежное истощение ресурсов в отложениях ПТ в этом регионе рано или поздно приведет к необходимости поисков УВ в глубокопогруженных и сложнопогруженных образованиях миоцена – палеогена для поддержания добычи углеводородного сырья в этом регионе.

Формулировка целей статьи. Исходя из всего вышеизложенного, уже сейчас необходимы исследования по выяснению основных критериев нефтегазоносности глубокопогруженного нижнемиоцен-палеогенового комплекса отложений в пределах западной бортовой зоны ЮКВ – одной из крупнейших зон нефтегазообразования и нефтегазонакопления для обоснования перспективных направлений поисков УВ в этом регионе.

Высокие оценки перспектив нефтегазоносности миоцен-палеогеновых отложений даны во многих работах (Гулиев и др. 2003, 2005; Дадашев, 2003). Однако поисково-разведочные работы на западном борту ЮКВ привели к открытию только одного нефтяного месторождения Умбаки, расположенного в Шемаха-Кобыстанском нефтегазоносном районе. Небольшие залежи известны и на Апшеронском полуострове (Полетаев, 2010). Кроме того, были использованы результаты исследований выбросов грязевых вулканов, расположенных в Западной бортовой зоне Южно-Каспийской впадины (Калмас, Кюрсангя, Малый Харами, Хамамдаг, Агзыбир, Бяндован, Ахтарма-Пашалы, Мишовдаг, Большой Кянизадаг, Дашгиль, Уталгы, Чеилдаг, Котурдаг, о. Дуванный, Алятской гряды и др.) (Салаев и др., 1987).

Системная обработка всех вышеизложенных материалов с учетом других данных по исследуемому региону позволила в определенной степени установить литолого-фациальную и формационную характеристики нижнемиоцен-палеогеновых образований исследуемого региона (Hudson et al., 2008).

Изложение основного материала. В целом литолого-фациальная характеристика нижнепалеогеновых образований южной части исследуемого региона (ЮВ часть Нижнекуринской впадины и сопредельные зоны шельфа Южного Каспия) представляется следующим образом: в результате размыва вулканогенных образований Мугано-Приталышской зоны, а также интенсивной вулканической деятельности Талышских вулканов, аккумуляровался значительный кластогенный и туфовый материал, который компенсировался интенсивным прогибанием прибреговой зоны впадины, где и накапливались туфогенно-терригенные образования (туфы, туфопесчаники, туфоконгломераты, песчаники и глины) мощностью от 200 до 800 м. В направлении к осевой части современной Нижнекуринской впадины отмечается уменьшение объема грубозернистых

осадков за счёт увеличения объема тонкозернистых песчаников, туфопесчаников и алевролитов: здесь преобладают глинистые и карбонатные образования (мергели, известняки), а мощность осадочных образований в результате интенсивного прогибания осевой зоны впадины составляет, по данным геофизических исследований, от 800–1000 до 1200 м (рис. 1).

В пределах северо-восточной части западной бортовой зоны в рассматриваемое время накапливались в целом более тонкозернистые фракции кластогенных образований (в основном глины, алевролиты, тонкозернистые песчаники), сносимые, по всей вероятности, из районов размыва в Северном Кобыстане и с Диббарского поднятия, а также в подчинённом количестве осаждался туфовый материал. По всей вероятности, он переносился аэральным путем из Талыша в бассейн осадконакопления Джейранкечмезской депрессии и прилегающих районов шельфа современного Каспия (Авербух и Альшейбани, 1990). Вышеуказанная зона в нижнепалеогеновое время испытала довольно интенсивное прогибание, которое лишь частично компенсировалось материалом сноса. Дополнительным источником материала осадконакопления служили карбонатные (хемогенные либо биогенные) осадки – мергели, известняки и доломиты, которые, судя по выбросам грязевых вулканов, имели в этом районе широкое распространение (см. рис. 1). Общая мощность накопившихся здесь осадков составила 2000–2500 м.

Переход к верхнепалеогеновому (нижнемайкопскому) времени характеризуется в южной части исследуемой зоны некоторым уменьшением площади Мугано-Предталышской суши, служившей источником питания кластогенного материала бассейна осадконакопления в этой зоне. Кроме того, к этому времени значительно уменьшилась вулканическая активность Талыша. Всё это в совокупности с некоторым замедлением прогибания осевой зоны впадины привело, как к изменению характера осадконакопления на данной территории, так и к резкому уменьшению до 500–1000 м мощности накапливаемых осадков, тогда как в юго-западной части зоны в разрезе отмечались ещё прослои туфового материала, чередующиеся с глинами, тонкозернистыми песчаниками и алевролитами, в осевой части этой зоны накапливались в основном карбонатные осадки (доломиты, известняки, сидериты), а также глины, что подтверждается данными выбросов грязевых вулканов Кюрсангя, Агзыбир, Ахтарма-Пашалы и поэтому резко отличается от установленных бурением литофациальных характеристик верхнего палеогена как для районов Предталышья, так и центрального и ЮЗ Кобыстана.

В районе Джейранкечмезской депрессии за майкопское время, по данным выбросов грязевых вулканов Большой Кянизадаг, Дашгиль, Уталгы, Чеилдаг, Котурдаг и анализа данных бурения в сопредельных районах Гобустана и зоны Алятской гряды, можно предполагать, что здесь, наряду с мощными глинистыми толщами с маломощными прослоями песков, песчаников и алевролитов, имели место также накопления карбонатных осадков (известняки, доломиты). Общая мощность накопившихся здесь осадков за майкопское время составляет около 1000 м (рис. 2).

Как видно из приведенных построений (см. рис. 1, 2), толща палеоген-миоценовых отложений наибольшей мощности до 3–3,5 км (на общем фоне 1,0–1,5 км) достигает в пределах Джейранкечмезской депрессии и в осевой зоне Нижнекуринской впадины.

Тектонические движения в исследуемой области в палеогене-миоцене, как в отношении предшествующего мезозоя, так и последующего плиоцен-антропогенового времени, носят в основном инверсионный характер.

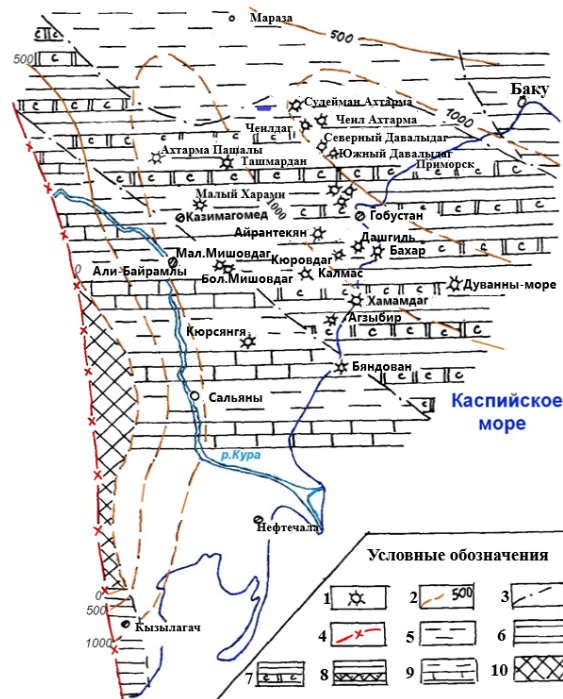


Рис. 1. Западная бортовая зона Южно-Каспийской впадины.

Схематическая карта литофаций и мощностей нижнепалеогеновых образований.

Условные обозначения: 1 – грязевые вулканы, в выбросах которых обнаружены породы нижнего палеогена;

2 – линии равных толщин нижнепалеогеновых образований; 3 – границы литофациальных зон;

4 – Западно-Каспийский глубинный разлом; 5 – глины; 6 – глины с отдельными пластами песчаника и мергелей;

7 – чередование глин, алевролитов, туфопесчаников, доломитов и мергелей; 8 – чередование глин, мергелей, песчаников;

9 – чередование глин, туфопесчаников, туфопелитов, туфоконгломератов; 10 – зона отсутствия нижнепалеогеновых образований



Рис. 2. Западная бортовая зона Южно-Каспийской впадины.

Схематическая карта литофаций и мощностей олигоцен-нижнемиоценовых образований.

Условные обозначения: 1 – грязевые вулканы, в выбросах которых обнаружены породы олигоцена–нижнего миоцена;

2 – линии равных толщин олигоцен-нижнемиоценовых образований; 3 – границы литофациальных зон;

4 – Западно-Каспийский глубинный разлом; 5 – глины; 6 – чередование глин, мергелей;

7 – чередование глин с отдельными пластами доломита и сидерита; 8 – чередование глин с туфобрекчиями;

9 – чередование глин и известняков; 10 – зона отсутствия олигоцен-миоценовых образований

Выводы. Таким образом, в палеогене и миоцене прогибание испытывают те участки ЮКВ, которые в мезозое характеризовались воздыманием. Участкам же, погружавшимся в плиоцене и антропогене, в палеогене – нижнем неогене соответствуют зоны воздыманий (Агабеков и др., 1992; Керимов и Авербух, 1982). Зонам с наибольшими мощностями палеогена и миоцена, как правило, соответствуют зоны с минимальными мощностями плиоцена-антропогена. Так, в зоне перехода от западного борта к современному шельфу Южнокаспийской впадины, в Коргалинском синклинии по плиоцену, мощности палеогена-миоцена составляют порядка 2200 м, тогда как мощность плиоцена-антропогена – 6700–7200 м.

Подводя итоги по формационному анализу миоцен-палеогеновых отложений западной бортовой зоны ЮКВ можно отметить, что нижняя часть этих отложений (нижнепалеогеновые образования) характеризуется терригенно-карбонатным формационным типом разреза, причем в южном направлении в этом разрезе, по всей вероятности, будет увеличиваться доля туфогенного материала (туфопесчаники, туффиты, туфоконгломераты), а в северо-восточном направлении – роль карбонатных пород (мергели, доломиты) и песчано-алевритовых разностей.

Общее нарастание мощности вышеуказанных отложений происходит также в северо-восточном направлении (от нулевых значений на СВ борту Талыш-Вандамского гравитационного максимума до 2500 м – в пределах Джейранкечмезской депрессии). Верхняя часть исследуемых образований (олигоцен-нижнемиоценовый комплекс пород) сложена в пределах западной зоны ЮКВ, в основном, в глинистой формации, причем в восточном направлении – в сторону центральной части ЮКВ отмечается появление в разрезе маломощных пластов известняков, мергелей и сидерита. Мощность вышеуказанных отложений в СВ направлении увеличивается от 500 до 1000 м (см. рис. 2).

Рассмотренные выше прогнозные оценки литофациальных и формационных особенностей нижнемиоцен-палеогеновых образований западного борта ЮКВ позволяют дать прогноз литолого-формационного критерия нефтегазоносности в рассматриваемой зоне. Как показали данные изучения физических параметров пород в выбросах грязевых вулканов ЮВ Кобыстана и Нижнекуринской впадины (Алиев, 2008), наиболее благоприятными для скопления УВ в разрезе палеогена здесь являются гранулярные и карбонатные коллекторы порово-трещинных и трещинно-поровых типов III–V классов. Эти породы также характеризуются удовлетворительными фильтрационными свойствами, и зона распространения вышеуказанных коллекторов охватывает большую часть исследуемой территории. Отмечается увеличение мощности коллекторов и улучшение их петрофизических свойств в южном и ЮВ направлениях (Салаев и др., 1987).

По совокупности литолого-фациальных и тектонических критериев нефтегазоносности к наиболее перспективным площадям для проведения предварительного этапа поисковых работ на нефть и газ (на нижнемиоцен-палеогеновый комплекс западного борта ЮКВ) можно отнести площади Дуванный, Кянизадаг, Сангачал-Хара Зыря, Котурдаг, Дашгиль, Хамамдаг, Агзыбир, Кюрса-ня. Здесь в первую очередь необходимо провести поисковые сейсморазведочные работы для уточнения тектонического строения исследуемых отложений и определения наиболее благоприятных мест заложения параметрических скважин.

Список использованных источников

- Авербух, Б.М. (1993). Формационная характеристика глубокопогруженных образований нижнего миоцена-палеогена западной бортовой зоны Южно-Каспийской впадины в связи с перспективами нефтегазоносности. *Нефть и газ*, 4.
- Авербух, Б.М., Альшейбани, М.Я. (1993). Особенности геологического строения и перспективы нефтегазоносности плиоцен-миоцена Шихияк-Анарской площади Джейранкечмезской депрессии (по новым геолого-геофизическим данным). *Азербайджанское нефтяное хозяйство*, 7, 8.
- Агабеков, М.Г., Салаев, С.Г., Авербух, Б.М., Аллахвердиев, Р.А. Мошашвили, А.Б. (1992). Структурно-фациальные особенности эоценовых отложений депрессионных зон Азербайджана. Баку: "Элм".
- Алиев, Ад.А. (2008). Эволюция представлений о грязевом вулканизме Южно-Каспийской впадины. *Труды Института геологии НАНА*, 37.
- Алиева, С.А., Авербух, Б.М., Серикова, У.С., Мустаев, Р.Н. (2014). Геология и нефтегазоносность Каспийской впадины. Москва: "Научно-издательский центр" ИНФРА-М.
- Баженова, О.К., Фадеева, Н.П., Сен-Жермес, М.Л., Арефьев, О.А., Боден, Ф. (2002). Биомаркеры органического вещества и нефти майкопской серии Кавказско-Скифского региона. *Геохимия*, 9, 993-1008.
- Выжва, С., Михайлов, В., Онищук, И. (2017). Петрофизические особенности пород майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 79 (4), 12–20.
- Гулиев, И.С., Алиева, Э.Г., Гусейнов, Д.А., Кадиров, Ф.А., Мамедов, П.З., Фейзуллаев, А.А. (2005). Углеводородные системы неравновесных бассейнов: возможности совершенствования поисков залежей нефти и газа. *Известия НАН, Науки о Земле*, 2, 3–23.
- Гулиев, И.С., Левин, Л.Е., Федоров, Д.Л. (2003). Углеводородный потенциал Каспийского региона. Баку: Изд-во Nafta-Press.
- Дадашев, Ф.Г. (1963). Углеводородные газы грязевых вулканов Азербайджана. Баку: АЗЕРНЕШР.
- Дадашев, Ф.Г., Мамедова, П.А., Полетаев, А.В. (2003). Зональное распределение грязевых вулканов в нефтегазоносных областях. *Геология нефти и газа*, 1.
- Керимов, В.Ю., Авербух, Б.М. (1982). Перспективы поисков стратиграфических и литологических залежей нефти и газа в палеоген-миоценовых отложениях Азербайджана. Баку: "Элм".
- Керимов, В.Ю., Рачинский, М.З., Колушкина, О.В. (n.d.) Условия нефтегазообразования в Южно-Каспийском бассейне. Получено с <http://article.gubkin.ru/ru/file/977>
- Михайлов, В. (2017). Сопоставительная характеристика майкопской серии Каспийско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 77 (2), 59–71.
- Михайлов, В. (2018). Нефтегазогенерационный потенциал майкопской серии. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 80 (1), 53–62.
- Михайлов, В., Загитко, В. (2017). Геохимические особенности майкопской серии Крымско-Черноморского региона. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*, 78 (3), 60–70.
- Петриченко, Ю.А. (2000). Геохимическая характеристика органического вещества майкопской серии Керченско-Таманского прогиба. *Вестник МГУ. Сер. 4. Геология*, 6, 64–66.
- Петриченко, Ю.А. (2001). Нефтематеринский потенциал отложений майкопской серии Индоло-Кубанского прогиба: автореф. дис. ... канд. геол.-минералог. наук. Москва.
- Полетаев, А.В. (2010). Изотопный состав углеводородных газов Южно-Каспийской впадины. Получено с Access mode: <http://seismology.az/journal/adminka/filemanager/files/customfiles/articles/2008/2007-2010/2010-17.pdf>.
- Салаев, С.Г., Авербух, Б.М., Мамедов, С.М., Чиковани, Э.В., Гаджиев, З.Р. (1984). Научные основы поисков новых нефтегазовых залежей в эоценовых отложениях депрессионных зон Азербайджана. *Тезисы доклада науч. конф., посвященной 110-летию со дня рождения И.М. Губкина*. Баку, Институт Геологии АН Азерб. ССР.
- Салаев, С.Г., Авербух, Б.М., Чиковани, Э.В. (1987). Классификация выявленных и прогнозируемых ловушек нефти и газа в палеогеновых отложениях Западного Азербайджана. *Доклады АН Азерб. ССР*, XLIII, 11.
- Эфендиева, М.А., Гулиев, И.С. (2013). Майкопская серия как один из нетрадиционных источников углеводородов Азербайджана. *Тр. VII Всеросс. Литологического совещания "Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории"*, 28-31 октября 2013 г., Новосибирск.
- Guliyev, I.S., Tagiyev, M.F., Feyzullayev, A.A. (2001). Geochemical characteristics of organic matter from Maikop rocks of eastern Azerbaijan. *Lithology and Mineral Resources*, 36, 3, 280–285.
- Hudson, S.M., Johnson, C.L., Rowe, H.D., Efendiyeva, M.A. Feyzullayev, A.A., Aliyev, C.S. (2008). Stratigraphy and geochemical characterization of the Oligocene-Miocene Maikop Series: implications for the paleogeography of Eastern Azerbaijan, *Tectonophysics*, 451, 1-4, 40–55.

References

- Agabekov, M.G., Salaev, S.G., Averbukh, B.M., Allahverdiev, R.A. Moshashvili, A.B. (1992). Structural and facial features of the Eocene deposits of the depressed zones of Azerbaijan. Baku: "Elm". [in Russian]
- Aliyev, Ad.A. (2008). The evolution of ideas about the mud volcanism of the South Caspian Basin. *Proceedings of the Institute of Geology of ANAS*, 37. [in Russian]

Aliyeva, S.A., Averbukh, B.M., Serikova, U.S., Mustaev, R.N. (2014). Geology and oil and gas potential of the Caspian basin. Moscow: "Scientific Publishing Center" INFRA-M. [in Russian]

Averbukh, B.M. (1993). Formation characteristic of deeply submerged formations of the Lower Miocene-Paleogene of the western side zone of the South Caspian basin in connection with the prospects of oil and gas. *Oil and Gas*, 4. [in Russian]

Averbukh, B.M., Alsheybani, M.Ya. (1993). Features of the geological structure and oil and gas prospects of the Pliocene-Miocene of the Shikhikaya-Anart Square of the Jeyrankechmez Depression (according to new geological and geophysical data). *Azerbaijan Oil Industry*, 7, 8. [in Russian]

Bazhenova, O.K., Fadeeva, N.P., Saint-Germes, M.L., Arefiev, O.A., Boden, F. (2002). Biomarkers of organic matter and oils of the Maikop series of the Caucasus-Scythian region. *Geochemistry*, 9, 993–1008. [in Russian]

Dadashev, F.G. (1963). Hydrocarbon gases of mud volcanoes of Azerbaijan Baku: AZERNESH. [in Russian]

Dadashev, F.G., Mamedova, P.A. Poletaev, A.V. (2003). Zonal distribution of mud volcanoes in oil and gas areas. *Geology of oil and gas*, 1. [in Russian]

Efendieva, M.A., Guliev, I.S. (2013). Maikop series as one of the unconventional sources of hydrocarbons in Azerbaijan. *Proceedings of VII All-Russian Lithological meeting "Sedimentary basins, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history"*, October 28–31, 2013. [in Russian]

Guliev, I.S., Alieva, E.G., Huseynov, D.A., Kadirov, F.A., Mamedov, P.Z. Feyzullaev, A.A. (2005). Hydrocarbon systems of nonequilibrium pools: possibilities for improving the search for oil and gas deposits. *Proceedings of NAS, Earth Sciences*, 2, 3–23.

Guliev, I.S., Levin, L.E., Fedorov, D.L. (2003). Hydrocarbon potential of the Caspian region. Baku: Publishing house, Nafta-Pres. [in Russian]

Guliyev, I.S., Tagiyev, M.F., Feyzullaev, A.A. (2001). Geochemical characteristics of organic matter from Maikop rocks of eastern Azerbaijan. *Lithology and Mineral Resources*, 36, 3, 280–285. [in Russian]

Hudson, S.M., Johnson, C.L., Rowe, H.D., Efendiyeva, M.A. Feyzullaev, C.S., Aliyev, C.S. (2008). Stratigraphy and geochemical characterization of the Oligocene-Miocene Maikop Series: implications for the paleogeography of Eastern Azerbaijan. *Tectonophysics*, 451, 1–4, 40–55.

Kerimov, V.Yu., Averbukh, B.M. (1982). Prospects for the search for stratigraphic and lithological deposits of oil and gas in the Paleogene-Miocene deposits of Azerbaijan. Baku: "Elm". [in Russian]

Kerimov, V.Yu., Rachinsky, M.Z., Kolushkina, O.V. (n.d.). Oil and gas formation conditions in the South Caspian basin. Retrieved from <http://article.gubkin.ru/file/977> [in Russian]

Mikhailov, V. (2017). Comparative characteristic of the Maykop series of the Caspian-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 77 (2), 59–71. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.77.07> [in Russian]

Mikhailov, V. (2018). Oil and gas generation potential of the Maykop series. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 80 (1), 53–62. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.80.07> [in Russian]

Mikhailov, V., Zagnitko, V. (2017). Geochemical features of the Maykop series of the Crimean-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 78 (3), 60–70. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.78.08> [in Russian]

Petrichenko, Yu.A. (2000). Geochemical characteristics of organic matter of the Maykop series of the Kerch-Taman trough. *Bulletin of Moscow State University. Ser. 4. Geology*, 6, 64–66. [in Russian]

Petrichenko, Yu.A. (2001). The oil potential of deposits of the Maykop series of the Indolo-Kuban trough. *Extended abstract of Candidate's thesis (Geol.-Min.)*. M. [in Russian]

Poletayev, A.V. (2010). Isotopic composition of hydrocarbon gases of the South Caspian Basin. Retrieved from http://seismology.az/journal/adminka/filemanager/files/custom_files/articles/2008/2007/2010/2010-17.pdf [in Russian]

Salaev, S.G., Averbukh, B.M., Chikovani, E.V. (1987). Classification of identified and predicted oil and gas traps in Paleogene sediments of Western Azerbaijan. Reports of the Academy of Sciences of Azerbaijan, XLIII, 11. [in Russian]

Salaev, S.G., Averbukh, B.M., Mamedov, S.M., Chikovani, E.V., Gadzhiev, Z.R. (1984). Scientific basis for the search for new oil and gas deposits in the Eocene deposits of the depressed zones of Azerbaijan. *Abstracts of a scientific conference dedicated to the 110th anniversary of I.M. Gubkin*. Baku, Institute of Geology, Azerbaijan Academy of Sciences. [in Russian]

Vyzhva, S., Mikhailov, V., Onishchuk, I. (2017). Petrophysical features of the rocks of the Maykop series of the Crimean-Black Sea region. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, 79 (4), 12–20. <http://doi.org/10.17721/1728-2713.79.02> [in Russian]

Надійшла до редколегії 01.09.2020

S. Aliyeva, PhD (Geol.-Min.), Associate prof.,
E-mail: suaza@mail.ru;
Azerbaijan State of Oil and Industry University,
34 Azadlig Ave., Baku, Azerbaijan

METHODS FOR PREDICTING THE LITHOLOGICAL AND FACIES CHARACTERIZATION OF DEEPLY SUBMERGED PROSPECTIVE OIL AND GAS DEPOSITS

These studies aimed at clarifying the formation characteristics of the Lower Miocene - the Paleogene of the region under consideration, in connection with the prospects of oil and gas potential.

For this purpose, a predictive assessment was made of the formation characteristics of the deeply submerged formations of the Lower Miocene - the Paleogene of the western side zone of the South Caspian megavalley (mainly the Nizhnekurinsky oil and gas region (NGO)) in connection with the prospects of oil and gas potential.

In addition, we used the results of studies of emissions of mud volcanoes located in the considered zone (the Nizhnekurinsky Depression and adjacent zones of the South Caspian shelf).

As a result of the study of drilling data in the adjacent areas of the Kobystan-Shemakha, Pre-Talysh and Yevlakh-Agdzhabedy troughs, data were obtained on the formation characteristics of the Lower Miocene-Paleogene deposits composing this zone. To the most promising areas for the preliminary stage of exploration for oil and gas (at the Lower-Miocene-Paleogene complex) of the western side of the Southeast, on the totality of lithologic-facial and tectonic criteria of oil and gas content, it is possible to attribute Duvanny, Kyanizadag, Sangachal-Khara Zyrya, Koturdag, Dashgil, Hamamdag, Agzibir, Kursangya areas.

Keywords: Lower Miocene, Yevlakh-Agdzhabedy Trough, formation characteristic, Duvanny, Kyanizadag, Sangachal-Khara Zyrya, Koturdag, Dashgil, Hamamdag, Agzibir, Kursangya.

C. Алиева, канд. геол.-минералог. наук, доц.,
E-mail: suaza@mail.ru;
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
пр. Азатлиг, 34, м. Баку, Азербайджан

МЕТОДИ ПРОГНОЗУ ЛІТОЛОГО-ФАЦІАЛЬНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЛИБОКО ЗАНУРЕНИХ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАФТОГАЗОНОСНИХ ПОКЛАДІВ

Наведені дослідження ставили своїм завданням з'ясування потенційної нафтогазоносності глибоко занурених і не вивчених бурінням покладів нижнього міоцену – палеогену в межах Південно-Каспійської западини.

З цією метою було проведено прогнозну оцінку формаційної характеристики глибоко занурених утворень нижнього міоцену – палеогену західної бортової зони Південно-Каспійської мегазападини (в основному Нижньокуринської нафтогазоносної області) у зв'язку з перспективами нафтогазоносності. Крім цього, було використано результати досліджень викидів грязьових вулканів, розташованих у зоні досліджень (Нижньокуринської западини і суміжних зон шельфу Південного Каспію).

За результатами даних буріння в суміжних районах Кобистано-Шемахинського, Предталицького й Євлах-Агджабединського прогинів, були отримані дані про формаційну характеристику нижньоміоцен-палеогенових відкладів, які становлять цю зону.

До найбільш перспективних площ для проведення попереднього етапу пошукових робіт на нафту і газ (на нижньоміоцен-палеогеновий комплекс) західного борту Південно-Каспійської западини, за сукупністю літолого-фаціальних і тектонічних критеріїв нафтогазоносності можна віднести такі площі: Дуванний, Кянїзадаг, Сангачал-Хара Зиря, Котурдаг, Дашгіль, Хаммадаг, Агзібір, Курсангя.

Ключові слова: нижній міоцен, Євлах-Агджабединський прогин, формаційна характеристика, Дуванний, Кянїзадаг, Сангачал-Хара Зиря, Котурдаг, Дашгіль, Хаммадаг, Агзібір, Курсангя.

ГІДРОГЕОЛОГІЯ, ІНЖЕНЕРНА ТА ЕКОЛОГІЧНА ГЕОЛОГІЯ

УДК 556.3: 631.16

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.13>А. Рокочинський¹, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua;П. Волк¹, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;Л. Токар¹, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.o.tokar@nuwm.edu.ua;О. Шевченко², д-р геол. наук, ст. наук. співроб.,
E-mail: shevch62@gmail.com;В. Турченко¹, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: fwg@ukr.net;Л. Волк¹, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;¹Національний університет водного господарства та природокористування,
вул. Соборна, 11, м. Рівне, 33000, Україна;²Український гідрометеорологічний інститут НАН України та ДСНС України,
пр. Науки, 37, м. Київ, 03028, УкраїнаМОДУЛЬ ДРЕНАЖНОГО СТОКУ
ЯК ВИЗНАЧАЛЬНИЙ ПОКАЗНИК ЕФЕКТИВНОЇ ДІЇ ДРЕНАЖУ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. О.Є. Кошляковим)

Фільтраційні розрахунки дренажу є фундаментальним завданням меліоративної гідрогеології. Вони необхідні як при зрошенні земель (запобігання засолення), так і при осушенні. Найважливішими параметрами закритого дренажу як головного засобу регулювання рівня ґрунтових вод та їхнього стоку до водоприймачів є відстань між дренами та глибина закладення дрен. Ці параметри залежать від комбінації гідрогеологічних, кліматичних і рельєфотвірних чинників. Природна дренальність території характеризується модулем підземного стоку, а штучна – дренажного стоку, величина якого забезпечує відведення зайвої води із ґрунту до необхідної норми осушення за визначений термін часу. Для виділення чинників, які впливають на розрахункові параметри дренажу, розглянуто два методи розрахунку міждренних відстаней: гідромеханічний, що ґрунтується на теоретичних засадах руху води в природних і технічних системах, та емпіричний, що ґрунтується на переважно статистичному опрацюванні даних численних натурних досліджень. Для кожного із методів виділено переваги та недоліки, викликані невизначеностями при схематизації чинників, що визначають параметри дренажу та ефективність його роботи. За результатами дослідження сформовано структурно-логічну схему, яка відображає вплив головних природних умов (кліматичних, гідрогеологічних, рельєфу) проектних показників ефективної дії дренажу (норма осушення, час, швидкість та обсяги водовідведення) на його розрахункові параметри (модуль дренажного стоку, міждренна відстань, віддаль від осі дрени до водотриву, діаметр дрени, характеристики фільтра тощо). Ці три групи чинників і показників є елементами складної багатопараметричної моделі. Для дослідження впливу мінливості основних чинників на відстані між дренами використано загальноприйнятну формулу (ДБН В.2.4-1-99) з урахуванням розробок О.Я. Олійника та А.І. Мурашка, яка враховує конструктивні особливості матеріального горизонтального дренажу. Також застосовано методи статистичного моделювання та теорії імовірності, за допомогою яких розроблено математичні моделі для визначення середнього квадратичного відхилення визначального чинника досліджуваної функції. Визначено, що модуль дренажного стоку кореспондується з величинами норми осушення та часу відведення надлишкової вологи і має істотний вплив на відстані між дренами (86...98 %). На основі запропонованого імовірнісного способу оцінювання модуля дренажного стоку розраховано, що відстані між дренами можна збільшити в 1,10...1,23 рази без істотного зменшення ефективності їхньої роботи, що дозволяє скоротити фінансові затрати на облаштування дренажу.

Ключові слова: дренаж, параметри, модуль дренажного стоку, міждренна відстань, неусталений рух, рівень ґрунтових вод, норма осушення, методи розрахунку, чинники, ефективність дії дренажу.

Постановка проблеми та обґрунтування чинників впливу на параметри дренажу. Територія Українського Полісся входить до зони достатнього та надлишкового зволоження. І хоч у зв'язку із глобальним потеплінням ця зона істотно звузилась, кількість опадів у дощові періоди доходить тут до 150 мм (а в Передкарпатті й більше) та є передумовою підтоплення або перезволоження територій. У посушливі періоди, за відсутності засобів двобічного регулювання режиму ґрунтових вод, виникають ділянки переосушених земель і загострюється пожежна загроза. Саме меліоративні системи двобічної дії із закритим матеріальним дренажем дають можливість досягти рівноваги водного балансу та поліпшити природні умови шляхом регулювання водного і повітряного режиму ґрунтів.

Основні площі осушених земель розташовані на Поліссі та в західному регіоні України і становлять 62 % меліоративного фонду. Майже на 70 % площ меліоративні системи мають закритий дренаж. Технічний стан внутрішньогосподарських осушувальних систем через збиткову діяльність більшості сільгоспвиробників призводить

до неспроможності виконання ними своєї основної функції – відведення надлишкових вод, а їхнє руйнування створює екологічні та техногенні ризики. Під час паводків збільшуються зони і терміни затоплення сільськогосподарських угідь і населених пунктів. Лише 29,6 % осушуваних земель Полісся мають сприятливий меліоративний режим, 56,6 % – задовільний, 13,8 % – незадовільний, що зумовлює потребу в реконструкції та модернізації меліоративних систем (Цуман, 2014). Завдання підвищення ефективності дії дренажу, з урахуванням економічних вимог щодо зменшення витрат на його облаштування, вимагає вдосконалення теоретичних основ його розрахунків.

Гідрогеологічні умови формування дренажного стоку, або природна і штучна дренальність, визначають економічну та екологічну ефективність дренажних систем. Оскільки на території Полісся переважає атмосферний тип водного живлення, то дренажний стік має явно виражений періодичний характер. Його загальна величина залежить, у першу чергу від кліматичних умов даного району – переважно від кількості опадів і випаровування. Крім кліматичних чинників, на величину дренажного

стоку впливають й інші природні умови, у тому числі фільтраційні властивості ґрунту та розчленованість рельєфу. При проектуванні та реконструкції осушувально-зволожувальних систем двобічної дії виконують фільтраційні та гідравлічні розрахунки дренажу, а згадані вище природні показники та характеристики (кількість опадів, випаровування, фільтраційні властивості ґрунтів, їхню водовіддачу, глибину залягання ґрунтових вод, ухил місцевості тощо) параметризують (Chen et al., 2013; Rokochinskiy et al., 2019; Kovalenko et al., 2019).

Найважливішими параметрами дренажу, що визначаються *фільтраційними* розрахунками, є відстань між дренами та глибина закладання дрен (Минаєв, 1985). Ці параметри залежать від багатьох факторів, які пов'язані між собою і можуть бути незалежними за імовірнісним змістом.

Параметри дренажу мають бути такими, щоб дренажна система могла підтримувати заданий водний режим на тій території, яку вона обслуговує. Вимоги до цього режиму визначаються нормою осушення, яка являє собою необхідну глибину ґрунтових вод для тієї чи іншої культури і яку потрібно підтримувати на осушуваній площі в окремі фази розвитку рослин. Крім того, для визначення водного режиму дренажної системи має значення допустима тривалість затоплення земель, умови залягання і фільтраційні властивості перезволожених ґрунтів, параметри дрен, які в сукупності безпосередньо чи опосередковано визначають ефективність дії дренажу.

При цьому слід відмітити, що модуль дренажного стоку є одним із трьох основних показників ефективності дії дренажу на перезволоженому території та на режим ґрунтових вод, і другим (а подекуди й першим) за значенням витратним елементом водного балансу дренажних ґрунтів, який безпосередньо або опосередковано входить до розрахункових залежностей міждренних відстаней через норму осушення, коефіцієнт фільтрації та час відведення надлишкового шару води.

Аналіз результатів дослідження дренажного стоку показує, що його тривалість, об'єм, а також модуль на системах з різноманітними відстанями між дренами і глибиною їхнього закладання істотно відрізняються. Спостереження за дренажним стоком на дослідних ділянках, що мають різні міждренні відстані (B), підтверджують загальну закономірність, що при зменшенні відстаней між дренами збільшуються модулі дренажного стоку. Величина модулів дренажного стоку на варіанті з $B = 10$ м є значно більшою, ніж за $B = 20$ м. Так, за забезпеченості $P = 2,0$ %, яку Ц.Н. Шкинкіс (Шкинкіс, 1981) рекомендує як розрахункову, модуль дренажного стоку, за відстані між дренами 10 м становив 0,78 л/с·га, а при $B = 20$ м – 0,36 л/с·га. Різниця величин модуля дренажного стоку є ще більшою за забезпеченості менше 2 %. Тобто максимальні значення дренажного стоку найбільше впливають на відстані між дренами.

Крім того, варто зазначити, що відстані між дренами тісно пов'язані з їхньою глибиною, оскільки саме співвідношення між глибиною і частотою дренажних елементів визначає динаміку рівня ґрунтових вод між дренами та дренажність ґрунту й території загалом (Минаєв, 1985).

Різна інтенсивність осушення, яка може бути виражена через ступінь штучної дренажності масиву, обумовлюється гідрогеологічною дією дренажу, визначальним показником якої є *модуль дренажного стоку*. За цим показником визначають конструкцію дренажних систем і розраховують параметри їхніх елементів.

Під час проектування дренажної системи, для досягнення оптимального рівня дренажності території, має закладатися такий *рівень надійності роботи системи*,

який забезпечується технічними, економічними та екологічними показниками ефективності її роботи.

Таким чином, багатопараметричність і багатофункціональність параметрів дренажу, які визначаються низкою чинників, відображають об'єктивну складність їхнього визначення, що зумовило розробку значної кількості методів і підходів до їхнього обґрунтування.

Мета роботи: на основі аналізу фільтраційних рівнянь з розрахунку дренажу визначити ступінь обумовленості або залежності модуля дренажного стоку від технологічних параметрів дренажу та природних показників (чинників), що їх визначають; виконати імовірнісне оцінювання параметрів, виділити 1–2 показники ефективності дії дренажу для оптимізації розрахункових моделей.

Отже, спочатку проаналізуємо підходи та залежності щодо визначення міждренних відстаней та з'ясуємо вагомість впливу чинників, які безпосередньо чи опосередковано впливають на величину відстані між дренами.

Аналіз методів визначення міждренних відстаней. На різних етапах розвитку меліоративної науки визначилися два основні методи розрахунку параметрів сільськогосподарського дренажу: *гідромеханічний*, що ґрунтується на теоретичних засадах руху води в природних і технічних системах, та *емпіричний*, що ґрунтується на переважно статистичному опрацюванні даних численних натурних досліджень. Кожен з них має свої переваги та недоліки.

Теоретичні засади дренажу ґрунтів були закладені у працях Дарсі, Дюпюї, І. Буссінеска. Розроблені ними теоретичні основи розрахунку основних параметрів сільськогосподарського дренажу отримали подальший розвиток у роботах О.М. Костякова, С.Ф. Авер'янова, В.В. Шестакова, О.Я. Олійника, М.Г. Пивовара, В.Л. Полякова, О.І. Івицького, А.І. Мурашка, В.Т. Климкова, В.А. Іоната, А.М. Янголя, Ш.А. Брусиловського, О.І. Голованова, В.Я. Шапрана, Л.Ф. Кожушка, М.О. Лазарчука, В.Г. Муранова, Р. Єггельсманна, Д. Кіркхема, Р. Гловера та ін. (Гадзала та ін., 2017).

Найбільшого поширення у вітчизняній практиці проектування дренажу на осушуваних землях набули залежності запропоновані свого часу О.М. Костяковим, С.Ф. Авер'яновим, А.М. Янголем, О.Я. Олійником, В.Л. Поляковим, В.С. Козловим, А.І. Івицьким, В.А. Іонатом, А.І. Мурашком та ін. (Гадзала та ін., 2017; Мажайский и др., 2017).

Однією із перших формул для визначення відстаней між дренами за гідромеханічним методом є формула І. Роте (Rothe, 1863), яка враховує інтенсивність атмосферних опадів:

$$B = 2H_p \sqrt{\frac{k}{q}}, \quad (1)$$

де H_p – напір води над дренами, м; k – коефіцієнт фільтрації, м/добу; q – приплив води до дрени, виражений через шар води, м/добу.

Формула справедлива для умов роботи дренажу в однорідному ґрунті, *усталеного* руху ґрунтових вод і залягання дрени на водотриві.

Для розрахунку недосконалих дрен широко застосовується формула С.Ф. Авер'янова

$$B = 2H_p \sqrt{\frac{k}{q} \left(1 + \frac{2m_g}{H_p}\right) \alpha}, \quad (2)$$

де $2m_g$ – відстань від дрени до водотриву, м; α – коефіцієнт "висячості".

Велику складність при визначенні віддалей між дренами за наведеними формулами становить розрахунок припливу води до дрен. Достовірність розрахунку обумо-

влюється насамперед точністю визначення атмосферного живлення на початок розрахункового періоду, а також точністю виділення поверхневого і дренажного стоку. Крім того, у природних умовах дуже рідко має місце усталений режим руху потоку ґрунтових вод.

Для неусталеного руху ґрунтових вод, однорідного ґрунту та досконалого дренажу при розрахунку відстані між дренами А.Н. Костяков (Костяков, 1960) запропонував таку формулу:

$$B = 2 \sqrt{\frac{k \cdot T_p \cdot h_1 \cdot h_2}{\phi \cdot \mu \cdot (h_1 - h_2)}}, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт фільтрації, м/добу; T_p – тривалість розрахункового періоду осушення, днів; μ – коефіцієнт гравітаційної водовіддачі; ϕ – коефіцієнт, що виражає форму депресійної кривої; h_1, h_2 – напір води у середній частині між дренами на початок і кінець розрахункового періоду, м.

Для тих самих умов може бути використана формула А.І. Івицького (Ивицкий и др., 1979):

$$B = 4 \cdot \sqrt{\frac{4k \cdot T_p \cdot h_0}{\pi \cdot \phi \cdot \mu \cdot \ln \frac{(b-u-h_0)(b-H+h_0)}{(b-u+h_0)(b-H-h_0)}}}, \quad (4)$$

де h_0 – напір води в дрени відносно її дна, м; b – глибина закладання дрени, м; u – глибина рівня ґрунтових вод (РГВ) на початок розрахункового періоду, м; H – проектна глибина залягання РГВ (норма осушення).

В однорідних ґрунтах, за більш глибокого залягання водотриву, для визначення відстані між закритою регулювальною мережею застосовуються формули А.М. Янголя, В.С. Козлова та інших авторів:

$$B = 2 \sqrt{\frac{H_p}{q} \left\{ k_1 \cdot H_p + 2B \frac{k_1 \cdot m}{B + 2\eta_1} + \lambda \cdot k_2 \left(\frac{m_g}{B + 2\eta_1} - \frac{m_g}{B + 2\eta_1^1} \right) \right\}}, \quad (8)$$

де m_g – відстань від дна дрени до водотриву, м; m – потужність однорідного ґрунту, що розташований нижче дрени, м; $\lambda, \eta_1, \eta_1^1$ – параметри, визначені залежно від коефіцієнтів фільтрації й потужності шарів ґрунту.

За ступенем наукового обґрунтування та врахування головних чинників впливу (властивості ґрунтів, елементи і конструкція регулювальної мережі тощо) можна виділити формули таких авторів:

- С.Ф. Авер'янова (1959)

$$B = \sqrt{B_0^2 + \left[m_g (B_2 + 4f_0) \right]^2} - m_g (B_2 + 4f_0), \quad (9)$$

$$B_0 = 2H_p \sqrt{\frac{k}{q} \left(1 + \frac{2m_g}{H_p} \right)}; \quad B_2 = \frac{4}{\pi} \ln \frac{1}{\sin \frac{\pi \cdot d}{2m_g}}; \quad (10)$$

- А.Н. Костякова (Костяков, 1960)

$$B = \frac{\pi \cdot k \cdot \Phi \cdot H_p}{q(2,31 \lg \frac{B}{d} - 1 + \pi \cdot f_0)}; \quad (11)$$

- А.І. Івицького (Ивицкий, 1988)

$$B = 2 \sqrt{\frac{2(H_p - h_e)T_p \cdot T}{8(h_p - \Delta H) + P_0 + \frac{8(H_k - H_{ок})T_p \cdot T}{L(L + 8\Phi_k)}} + 4\Phi^2 - 4\Phi}; \quad (12)$$

- формула А.М. Янголя (Янголь, 1965):

$$B = 2 \sqrt{\frac{k \cdot T_p \cdot \alpha \cdot h_1 \cdot h_2}{\mu \cdot (H_p - \alpha_1 h_2) + p^{-e}}}; \quad (5)$$

- формула В.С. Козлова (Козлов, 1940):

$$B = 2,25 \sqrt{\frac{k \cdot T_p \cdot h_1 \cdot h_2 \sqrt{\alpha}}{\mu \cdot (h_1 - h_2)}}, \quad (6)$$

де α_1 і μ – коефіцієнти, що враховують форму кривої депресії; α – коефіцієнт, що враховує недосконалість дренажу.

Одним із недоліків наведених формул є відсутність урахування ступеня зволоження території (за винятком формули А.М. Янголя). Для різних кліматичних зон наведені вище формули, за інших рівних умов, дають одну й ту ж саму відстань між дренами, хоч це не підтверджується результатами досліджень і практикою експлуатації дренажних систем.

При двошаровому ґрунті для розрахунку відстані між дренами А.І. Івицький (Ивицкий, 1988) пропонує формулу

$$B = 2 \sqrt{\frac{\alpha \cdot (H_p - h_0) \cdot b \cdot T_p}{\mu \cdot (h_p \cdot u) + P_0} + 4\Phi^2 - 4\Phi}, \quad (7)$$

де H_p – розрахункова глибина РГВ від поверхні ґрунту, м;

P_0 – кількість води, що підлягає відведенню за рахунок випадання опадів, яка виражена через шар стоку, м; Φ – фільтраційний опір, м. Цю формулу рекомендується використовувати і для багатошарового ґрунту шляхом переходу до двошарової схеми.

Для таких самих умов може бути використана формула В.А. Іоната (Ионат, 1962)

- А.І. Мурашко (Мурашко, 1982)

$$B = 4 \left(\sqrt{L_{но}^2 + \frac{\tau \cdot T}{4\mu}} - L_{но} \right), \quad (13)$$

де T – водопровідність пласта, м²/добу; P_0 – інтенсивність живлення, м/добу.

Для більш складних умов можуть бути використані формули О.Я. Олійника (Олейник, 1981) та інших авторів (Олейник и Поляков, 1987; Поляков, 2016), а також методи моделювання гідродинамічних процесів (Vrugh et al., 2003; Гадзала та ін, 2017; Мажайский и др., 2017).

У країнах Західної Європи широке застосування отримали формули Хоогхаудта і Ернста (der Pboeg et al., 1999), для застосування в одно- і багатошарових ґрунтах:

- формула Хоогхаудта

$$B = \frac{8R_2 \cdot H_p \cdot d}{q} + \frac{4k_1 \cdot H_p^2}{q}; \quad (14)$$

- формула Ернста

$$B = q \frac{D_v}{k_1} + \frac{q \cdot B^2}{8(k_1 \cdot D_1 + k_2 \cdot D_2)} + \frac{q \cdot B}{\pi \cdot k_1} \ln \frac{cD_0}{\pi \cdot r}, \quad (15)$$

де d – еквівалентна товщина водоносного шару нижче осі дрени, м; D_1, D_2 – потужність першого і другого шарів, м; D_v – потужність шару від верха дрени до депресійної кривої, м; D_0 – потужність шару від верха дрени до лінії розділу шарів ґрунту, м.

У Румунії при розрахунку міждренних відстаней використовують залежність (Halbac-Cotoara-Zamfir, Costescu, 2010):

$$L^2 = \frac{4K(2d_e + h + \frac{d_{dren}}{2})}{q}, \quad (16)$$

де K – гідралічна провідність пласта; d_e – еквівалентна відстань від осі дрени до водотриву; d_{dren} – діаметр дрени; q – модуль дренажного стоку.

При цьому слід зазначити, що **гідромеханічний метод** визначення відстаней між дренами є найбільш теоретично обґрунтований, але разом із тим має низку недоліків. Так, істотним недоліком гідромеханічних формул є неврахування умов формування дренажного стоку у фазі підняття РГВ, яка є більш напруженою порівняно із фазою спаду. Необхідно також зазначити, що цей метод розрахунку відстаней між дренами не має належного економічного й екологічного обґрунтування.

Перераховані недоліки методу зовсім не означають, що ним не слід користуватися. Як найбільш теоретично обґрунтований цей метод дає змогу здійснювати якісний аналіз чинників гідрогеологічної дії дренажу, гідродинамічних процесів, що відбуваються в ґрунтах. Гідромеханічні формули мають також величезне значення при узагальненні даних польових досліджень дренажу – у цьому плані їхню роль важко переоцінити.

У практиці проектування дренажних систем розповсюджені також **емпіричний метод**, за яким відстань між дренами встановлюється залежно від одного або декількох чинників, що впливають на інтенсивність осушення (гранулометричний склад, фізико-хімічні властивості ґрунту, інтенсивність атмосферних опадів, водопроникність порід тощо). До його основи покладено припущення, що чим важчі ґрунти та нижчі їхні фільтраційні властивості, тим меншими мають бути відстані між дренами. Найчастіше у вітчизняній практиці проектування дренажу застосовуються емпіричні залежності, запропоновані Ц.Н. Шкинкісом, Х.А. Писарьковим, А. Думбляускасом, В.П. Кубишкіним.

За Ц.Н. Шкинкісом (Шкинкіс, 1981), розрахункове значення відстані між дренами для конкретного об'єкта визначається за формулою

$$B = B_n \cdot K, \quad (17)$$

де B_n – нормальна відстань між дренами, яка визначається за графіком залежно від механічного складу ґрунту; K – поправочний коефіцієнт, залежить від природних умов об'єкта

$$K = K_u \cdot K_g \cdot K_h \cdot K_v \cdot K_i \cdot K_K, \quad (18)$$

тут K_u – коефіцієнт, який залежить від ступеня водності даного району; K_g – коефіцієнт, який залежить від ступеня оглеєння ґрунту; K_h – коефіцієнт, який залежить від гідрогеологічних умов; K_v – коефіцієнт залежний від рельєфу; K_K – коефіцієнт, який залежить від хімічних властивостей ґрунтів; K_i – коефіцієнт, що залежить від сільськогосподарського використання земель.

Х.А. Писарьков (Писарьков, 1978) пропонує визначати міждренну відстань залежно від гігроскопічної вологості ґрунту за формулою:

$$B = N \frac{\epsilon - H_p}{\sqrt{5P}}, \quad (19)$$

де ϵ – глибина дренажу, м; P – середньодобова інтенсивність опадів, мм; N – коефіцієнт, який залежить від механічного складу ґрунту.

Для гумідної зони України В.П. Кубишкін (Гадзала та ін, 2017) розробив методику розрахунку відстані між дренами, яка значною мірою не має перерахованих вище недоліків. Згідно із цією методикою розрахункова відстань між дренами визначається за формулою

$$B_p = B_{on} \cdot K_c \cdot K_{\epsilon} \cdot K_h \cdot K_A \cdot K_u \cdot K_K, \quad (20)$$

де B_{on} – оптимальна відстань між дренами, визначається за таблицею залежно від генетичного типу ґрунту, коефіцієнтів фільтрації й ухилу поверхні землі; $K_c, K_{\epsilon}, K_h, K_A, K_u, K_K$ – поправочні коефіцієнти, які враховують відповідно висоту шару нахилу його підошвою, експозицію ухилу, напір ґрунтових вод, глибину закладання дрени, ступінь зволоження території, характер господарського використання території.

У наш час, в умовах Латвії, А. Думбляускас рекомендує B визначати за залежністю

$$B = 3 \sqrt[3]{\frac{\Gamma \cdot b_h}{q_0}}, \quad (21)$$

де Γ – коефіцієнт, залежить від фізико-механічних властивостей ґрунту; q_0 – модуль дренажного стоку, л/с 1га; b_h – параметр, визначається залежно від глибини закладання дрени і напору води між дренами.

Недоліками наведеної залежності є неврахування ступеня оглеєння, виду водного живлення, глибини залягання водотриву.

У країнах Західної Європи широке застосування також отримали формули для визначення відстаней між дренами з використанням емпіричного методу. Для проектування дренажу на Закарпатті та Прикарпатті із 1898 р. користувалися шкалою А. Корнелла. За цією шкалою відстань між дренами визначається залежно від відсоткового вмісту фракції ґрунту розміром менше 0,05 мм. У Польщі B визначають також залежно від показника гранулометричного складу ґрунту (Гадзала та ін, 2017; Мажайский и др., 2017):

$$M = M_1 + \frac{1}{3} M_2, \quad (22)$$

де M_1 і M_2 – вміст у ґрунті часток розміром менше 0,01 мм і 0,01...0,05 мм, %. У цьому випадку відстані між дренами будуть меншими, ніж розраховані за шкалою А. Корнелла (для глинистих ґрунтів 8...15 м, для супіщаних – 18...22 м).

У Німеччині, Франції та Австралії відстань між дренами з урахуванням глибини їхнього закладання визначають за графіком залежно від вмісту в ґрунті фракції розміром менше 0,02 мм.

Мітчерліх пропонує співвідношення B/ϵ визначати залежно від гігроскопічної вологості ґрунту:

$$\frac{B}{\epsilon} = 23,6 - 14 I_g \theta, \quad (23)$$

де ϵ – глибина дренажу, м; θ – гігроскопічна вологості ґрунту.

Значною перевагою емпіричного методу розрахунку міждренних відстаней є його простота і широке застосування, але він також має недоліки. Як показує практика, він потребує значних затрат на реалізацію і водночас має дуже обмежені рамки застосування, які визначені зональними умовами розташування досліджуваного об'єкта.

Викладення основного матеріалу. Як бачимо, у зв'язку з наявністю великої кількості різномірних чинників і процесів на дренажних територіях різні автори приділяють увагу та віддають пріоритет дещо відмінним показникам та чинникам впливу на параметри дренажу, що призвело до створення численних залежностей. При цьому умови формування дренажного стоку мають невідзначений характер у часі. Економічна та екологічна ефективність роботи дренажної системи визначається її технічними характеристиками, тобто конструктивними параметрами дренажу, розрахунки яких базуються на чинниках гідрогеологічної дії дренажу. Тому, щоб вибрати оптимальну для певних умов модель міждренної відстані, потрібно розташувати чинники за рейтингом

впливу, позбувшись найменш впливових з них. Для цього можуть бути використані статистичні методи.

На рис. 1 наведена структурно-логічна схема, яка відображає вплив природних умов, представлених як параметризовані предиктори (шар опадів, коефіцієнт фільтрації ґрунтів тощо), на параметри дренажу (відстані між дренами, глибини та ухили закладання, відстані від осі дрен до водотриву, діаметри дрен і характеристики їхньої фільтрувальної частини), які у свою чергу визначають та обернено залежать від модуля дренажного стоку, норми осушення та часу, протягом якого відводиться шар води з ґрунту, і є елементами складної багатопараметричної моделі.

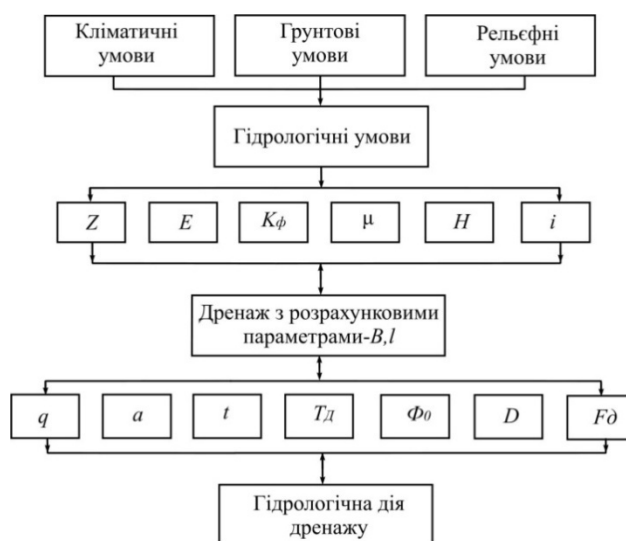


Рис. 1. Структурно-логічна схема формування гідрогеологічної дії дренажу:

k_{ϕ} – коефіцієнт фільтрації; Z – шар опадів; E – шар випаровування; μ – коефіцієнт водовіддачі; H – глибина залягання РГВ; i – ухил поверхні землі; Φ_0 – фільтраційні опори за характером розкриття водоносного пласту; q – модуль дренажного стоку; a – норма осушення; t – час, протягом якого відводиться шар води з ґрунту; T_d – віддаль від осі дрени до водотриву; D – діаметр дрени; F_{δ} – характеристика фільтра дренажу

Таким чином, гідрогеологічна дія дренажу є визначальним чинником ефективності роботи дренажної системи і безпосередньо залежить від розрахункових параметрів дренажу, а саме, – відстані між дренами. У свою чергу, міждренна відстань, згідно з виконаним аналізом її розрахункових залежностей є багатопараметричною функцією (див. рис. 1), в якій доцільно виявити параметри, що мають найбільший вплив на кінцевий результат її формування.

Тому, безумовно, нагальним практичним завданням є дослідження впливу варіабельності головних чинників на відстань між дренами. Для вирішення сформульованого завдання доцільно застосувати методи статистичного моделювання та методи теорії імовірності (Вентцель, 1969). Нині проектування об'єктів гідромеліоративних систем базується на детерміністичних залежностях. При цьому визначальний параметр Y , який характеризує працездатність системи, часто є функцією кількох аргументів x_i , тобто маємо функцію (Науменко, 1994; Науменко та Токар, 2001):

$$Y = F(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (24)$$

Нерідко природа аргументів $x_1, x_2, \dots, x_n$ така, що вони є не детерміністичними, а випадковими величинами. У цьому разі значення функції також набувають випадкових величин, які мають відповідну імовірність. Таким чином, отримання визначального параметра Y з певною імовірністю дає відповідну гарантію не перевищення,

тоді як детерміністичні параметри та методи їхніх розрахунків такої гарантії не дають.

Якщо детерміністичні залежності побудовано на базі достатньої кількості дослідних даних, то значення функції за відповідних значень аргументів буде дорівнювати математичному сподіванню:

$$m_Y = F(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_n}). \quad (25)$$

Такі аналітичні детерміністичні залежності можуть бути використані для оцінювання середніх квадратичних відхилень функції.

У переважній більшості випадків функція (24) нелінійна. Проте у вузькому діапазоні зміни своїх аргументів нелінійні функції можна наближено замінити лінійними. Для цього використовують метод лінеаризації функції (Вентцель, 1969).

Якщо величини $x_1, x_2, \dots, x_n$ не корельовані, то дисперсія і середнє квадратичне відхилення функції дорівнюють

$$D_Y = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_m^2 D_{x_i}, \quad (26)$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_i} \right)_m^2 \sigma_{x_i}^2. \quad (27)$$

Частинні похідні у залежностях (26), (27) з індексом m означають, що їхні значення обчислюють при $x_i = m_i$. Вирази для визначення частинних похідних отримують

диференціюванням аналітичної детерміністичної залежності для функції (25).

Для оцінювання достовірності (надійності) значень функції потрібно мати не лише її числові характеристики (математичне сподівання, дисперсію, середнє квадратичне відхилення), але й закон розподілу функції.

У багатьох випадках на значення аргументів впливає значна кількість факторів, унаслідок чого розподіл аргументів близький до нормального. Тому і функція має нормальний розподіл з параметрами m_Y, σ_Y , які визначаються за формулами (25)–(27) (Науменко, 1994; Вентцель, 1969).

У такому разі для визначення функції із заданою імовірністю можна використати поняття квантиля або довірчі інтервали (Вентцель, 1969)

$$P(Y - Y_p) = P_U, \quad (28)$$

$$I_{Y,p} = (m_Y - t_\beta \sigma_Y; m_Y + t_\beta \sigma_Y), \quad (29)$$

де Y_p – таке значення випадкової величини Y , для якої умова $Y < Y_p$ виконується з імовірністю $P_U, t_\beta = f(\beta)$; β – імовірність довіри, з якою випадкова величина Y накривається інтервалом (29).

Для нормального розподілу функції Y одержано

$$P\left(\frac{Y - m_Y}{\sigma_Y} \leq U_p\right) = P_U, \quad (30)$$

де U_p – квантиль імовірності P_U , який дорівнює кількості середніх квадратичних відхилень σ_Y випадкової величини Y , які потрібно відкласти праворуч від її середнього значення $y = m_Y$.

У практичних розрахунках для визначення оцінок σ_{x_i} можна використати дослідні дані, відповідні аналітичні залежності або поле нормативних допусків (Вентцель, 1969). Наприклад, якщо

$$x = \bar{x} \pm \Delta x, \quad (31)$$

то згідно з правилом "трьох сигм" наближено можна отримати

$$\sigma_x = \frac{1}{3} \Delta x. \quad (32)$$

Тоді, використовуючи допустимий або бажаний рівень надійності споруди, можна визначити величину визначального (головного) її параметра (Науменко, 1994). Наприклад, для рівнів надійності $P = P_U = 0,90$ і $P = P_U = 0,99$ відповідно маємо $U_p = 1,282$ і $U_p = 2,326$. Далі отримуємо

$$\left. \begin{aligned} Y_{0,90} &= m_Y + U_p \sigma_Y = m_Y + 1,282 \sigma_Y \\ Y_{0,99} &= m_Y + U_p \sigma_Y = m_Y + 2,326 \sigma_Y \end{aligned} \right\}. \quad (33)$$

Імовірність того, що споруда з визначальним параметром не виконує своїх функцій дорівнює

$$R_Y = 1 - P_U = \frac{1 - \beta}{2}, \quad (34)$$

де β – імовірність довіри, з якою визначальний параметр Y накривається інтервалом (29).

Для виявлення домінантних чинників впливу на параметри, що описують відстань між дренами, доцільно використати загальноприйняту формулу з урахуванням розробок О.Я. Олійника та А.І. Мурашка згідно з ДБ В.2.4-1-99 (ДБН..., 1999), яка достатньо повно враховує конструктивні особливості матеріального горизонтального дренажу. Ефективність її застосування

підтверджена іншими дослідниками та практикою, як у зоні осушувальних, так і зрошувальних меліорацій.

Для аналізу величини відстаней між дренами в однорідному ґрунті при атмосферному та ґрунтовому водному живленні використано залежність для випадку, коли відстань від осі дрени до водотриву $T_d \leq B/4$, де B – відстань між дренами, яка визначається за формулою

$$B = 4 \left(\sqrt{\Phi^2 + \frac{HT}{2q}} - \Phi \right), \quad (35)$$

де Φ – загальні фільтраційні опори

$$\Phi = \frac{T_d}{\pi} \ln \left(\frac{2T_d}{\pi D} \right) + \frac{2h_0}{\pi} \ln \frac{4h_0}{\pi D} + \frac{T_d \Phi_0}{\pi} + \frac{2h_0}{\pi} \Phi_0, \quad (36)$$

де D – зовнішній діаметр дрени, м; Φ_0 – фільтраційні опори за характером розкриття водоносного пласту; H – розрахунковий напір, м; T – водопровідність пласта, м²/добу; q – інтенсивність інфільтраційного живлення, м/добу.

Схема для розрахунку відстаней між дренами зображена на рис. 2. На початку розрахункового періоду РГВ збігається з поверхнею ґрунту.

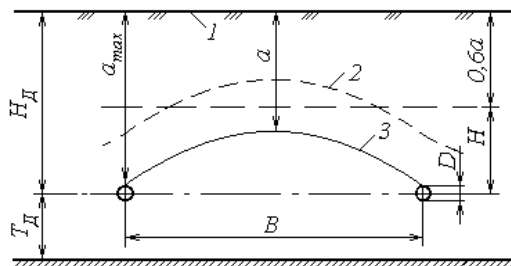


Рис. 2. Схема для розрахунку відстаней між дренами:
1; 2; 3 – рівні ґрунтових вод

Параметри H , T , q та h_0 , що входять у формули (35), (36), для режиму осушення визначаються за залежностями:

$$H = H_d - 0,6a, \quad (37)$$

$$T = k_\phi (h_0 + T_d), \quad (38)$$

$$h_0 = 0,5H, \quad (39)$$

$$q = \frac{W}{t}. \quad (40)$$

У залежностях (37)–(40) маємо: H_d – глибина від поверхні ґрунту до осі дрени, м; a – норма осушення, м; k_ϕ – коефіцієнт фільтрації, м/добу; W – шар води, який треба відвести з ґрунту протягом часу t , діб, визначається за формулою

$$W = h_s + Z + E + \mu a, \quad (41)$$

де h_s – шар води, що залишився на поверхні після сходу весняних або зливових вод, м; Z – шар опадів за розрахунковий період, м; E – шар випаровування за розрахунковий період, м; μ – коефіцієнт водовіддачі, який в даній роботі визначено за формулою (ДБН..., 1999):

$$\mu = 0,056 \sqrt{k_\phi a^{1/3}}, \quad (42)$$

де a – норма осушення, м; k_ϕ – коефіцієнт фільтрації, м/добу.

Для подальших розрахунків та аналізу беремо: $h_s = 0$; $Z = E$.

Тоді інтенсивність інфільтраційного живлення визначається як

$$q = \frac{\mu \cdot a}{t} \quad (43)$$

Ураховуючи вирази (37)–(43), залежності (35) і (36) можна записати у вигляді

$$B = 4 \left[\sqrt{\Phi^2 + \frac{k_{\phi}^{1/2} t \left[0,5 (H_d - 0,6a) + T_d \right] (H_d - 0,6a)}{0,112a^{4/3}}} - \Phi \right] \quad (44)$$

$$\Phi = \frac{T_d}{\pi} \ln \left(\frac{2T_d}{\pi D} \right) + \frac{2(H_d - 0,6a)}{\pi} \ln \left(\frac{2(H_d - 0,6a)}{\pi D} \right) + \frac{T_d \Phi_0}{\pi} + \frac{(H_d - 0,6a) \Phi_0}{\pi} \quad (45)$$

Аналізуючи зв'язки між параметрами формул (44) і (45), видно, що

$$B = f(H_d; T_d; k_{\phi}; a; \Phi_0; t; D), \quad (46)$$

де параметри t і D для кожного конкретного випадку задаються як сталі величини. Решта параметрів функції (46) за своєю природою належить до випадкових величин, тобто мають свою варіацію на площі системи.

Ураховуючи формулу (27) та функціональну залежність (46), середнє квадратичне значення відстаней між дренами дорівнює

$$\sigma_B = \left(\frac{\partial B}{\partial H_d} \sigma_{H_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial k_{\phi}} \sigma_{k_{\phi}} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial T_d} \sigma_{T_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial a} \sigma_a \right)^2 + \left(\frac{\partial B}{\partial \Phi_0} \sigma_{\Phi_0} \right)^2 \quad (47)$$

Для визначення часткових похідних, що входять у формулу (47), використано залежності (44) і (45).

$$\frac{\partial B}{\partial H_d} = \frac{8}{\pi} \left(\ln \frac{H}{\pi D} + \frac{\Phi_0}{2} + 1 \right) \left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1 \right) + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_{\phi}^{1/2} t (H + T_d)}{0,112a^{4/3}}; \quad (48)$$

$$\frac{\partial B}{\partial k_{\phi}} = \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{t (0,5H + T_d) H}{\sqrt{k_{\phi}} 0,224a^{4/3}}; \quad (49)$$

$$\frac{\partial B}{\partial T_d} = \frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{2T_d}{\pi D} + \Phi_0 + 1 \right) \left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1 \right) + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_{\phi}^{1/2} t H}{0,112a^{4/3}}; \quad (50)$$

$$\frac{\partial B}{\partial T_d} = \frac{4}{\pi} \left(\ln \frac{2T_d}{\pi D} + \Phi_0 + 1 \right) \left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1 \right) + \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_{\phi}^{1/2} t H}{0,112a^{4/3}}; \quad (51)$$

$$\frac{\partial B}{\partial a} = \frac{4,8}{\pi} \left(\ln \frac{2H}{\pi D} + \frac{\Phi_0}{2} + 1 \right) \left(1 - \frac{\Phi}{\sqrt{N}} \right) - \frac{2}{\sqrt{N}} \cdot \frac{k_{\phi}^{1/2} t \left[0,6(H + T_d) a + \frac{4}{3}(0,5H^2 + HT_d) \right]}{0,112a^{7/3}}; \quad (52)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \Phi_0} = \frac{4}{\pi} (T_d + H) \left(\frac{\Phi}{\sqrt{N}} - 1 \right). \quad (53)$$

У формулах (48) – (53) N – параметр, що дорівнює

$$N = \Phi^2 + \frac{k_{\phi}^{1/2} t \left[0,5(H_d - 0,6a) + T_d \right] (H_d - 0,6a)}{0,112a^{4/3}} \quad (54)$$

Для визначення величини σ_B використано нормативні допуски та дані досліджень щодо зміни коефіцієнтів фільтрації в придренній зоні (Мелиорация..., 1985).

Аналіз впливовості параметрів на відстань між дренами виконано шляхом комп'ютерного експерименту за варіантами, які розглядають такі змінні умови:

- за нормою осушення $a = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ м;
- за тривалістю зниження рівня ґрунтових вод $t = 2; 4; 7; 10$ діб;
- за коефіцієнтом фільтрації $k_{\phi} = 0,5; 1,0$ м/добу;
- за глибиною закладання дрени $H_d = 1$ м;
- за відстанню від осі дрени до водотриву $T_d = 2$ м.

Розглянуто дренаи з гончарних труб, зовнішній діаметр яких $D = 0,055$ м. Фільтраційні опори $\Phi_0 = 1$.

Відповідно до залежності (32) максимальне відхилення випадкової величини від її середнього значення можна записати так

$$\Delta x = 3\sigma_x = 3V_x \bar{x}, \quad (55)$$

де V_x – коефіцієнт варіації випадкової величини x .

Ураховуючи рекомендації (ДБН..., 1999) для розрахунків, прийнято:

$$\Delta a_{\max} = 0,1 \text{ м}; \Delta k_{\phi \max} = 0,1 \text{ м}; \Delta T_{d \max} = 0,15 T_d;$$

$$V_{k\phi} = 0,0333; V_{Td} = 0,05; V_{Nd} = 0,015; V_{\Phi_0} = 0,05.$$

Відповідно:

$$\sigma_a = 0,0333; \sigma_{k\phi} = 0,0333 k_{\phi}; \sigma_{Td} = 0,05 T_d;$$

$$\sigma_{Nd} = 0,015; \sigma_{\Phi_0} = 0,05 \Phi_0.$$

У розрахунках величини σ_B та B ряд проміжних розрахункових величин позначено таким чином:

$$\begin{aligned} \Pi_H &= \left(\frac{\partial B}{\partial H_d} \sigma_{H_d} \right)^2; \quad \Pi_k = \left(\frac{\partial B}{\partial k_{\phi}} \sigma_{k_{\phi}} \right)^2; \\ \Pi_T &= \left(\frac{\partial B}{\partial T_d} \sigma_{T_d} \right)^2; \\ \Pi_a &= \left(\frac{\partial B}{\partial a} \sigma_a \right)^2; \quad \Pi_{\Phi} = \left(\frac{\partial B}{\partial \Phi_0} \sigma_{\Phi_0} \right)^2. \end{aligned} \quad (56)$$

За результатами машинного експерименту побудовано гістограму впливовості мінливих природних і технологічних (конструктивних) чинників на величину відстані між дренами (рис. 3). Відповідні параметри Π_i на рис. 3 представлені у відсотках від σ_B^2 . З рис. 3 видно, що найбільш впливовим параметром на значення B є норма осушення, питома вага якої у σ_B^2 досягає 84...94 %. При цьому вагомість впливу коефіцієнта фільтрації становить лише 2...4 %.

Оскільки функціональна ефективність (або гідрогеологічна дія) дренажу проявляється через дренаваність території загалом, то її основними показниками є норма осушення і час відведення надлишкової води, які відображають інтенсивність осушення території, що традиційно представляється тотожним параметром – модулем дренажного стоку. Отже, найвагомішим показником при визначенні відстаней між дренами є **модуль дренажного стоку**, питома вага якого становить 86...98 %.

Оскільки модуль дренажного стоку має виражений імовірнісний характер формування, то виникає необхідність у визначенні імовірнісних інтервалів його величини та розрахунку довірчих інтервалів міждренних відстаней.

Наведені вище розрахунки в рамках машинного експерименту дають змогу виконати імовірнісне оцінювання відстаней між дренами B за заданої необхідної імовірності довіри β .

Так, наприклад, при $t = 4$ доби, $k_{\phi} = 0,5$ м/добу, $a = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$ м, межі довірчого інтервалу для B , при імовірності довіри $\beta = 0,90$, наведено в табл. 1 та проілюстровано на рис. 4.

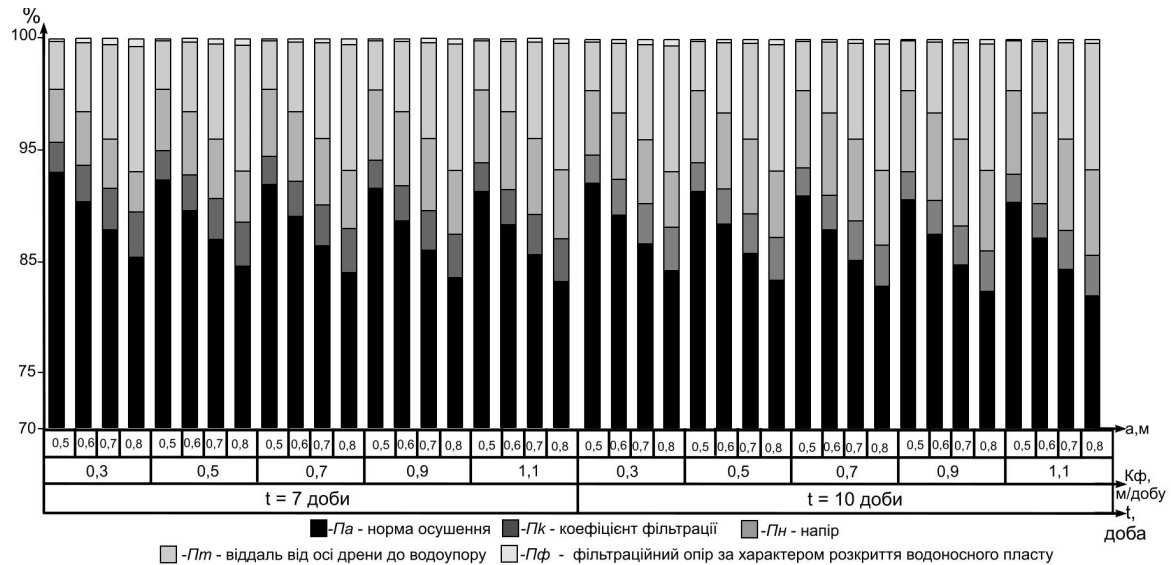


Рис. 3. Гістограми впливовості параметрів, що використовуються в розрахунках дренажу, на величину відстані між дренами для різного часу зниження РГВ або відведення надлишкової вологи (від 2 до 10 діб)

Таблиця 1

Межі довірчого інтервалу для відстаней між дренами B за імовірності довіри $\beta = 0,90$ і $t = 4$ доби

k_{ϕ} , м/добу	a , м	B , м	σ_B , м	$\Delta B = t_{\beta} \sigma_B$, м	B_{min} , м	B_{max} , м	$\frac{\Delta B}{B} \cdot 100\%$
0,5	0,5	28,48	2,31	3,80	24,68	32,28	13,34
	0,6	22,78	1,71	2,81	19,97	25,59	12,35
	0,7	18,49	1,34	2,20	16,29	20,69	11,92
	0,8	15,12	1,08	1,78	13,34	16,90	11,75

З порівняння середніх значень відстаней B , які обчислені за формулою (46), з межами довірчих інтервалів B_{min} і B_{max} , що відповідають довірчій імовірності $\beta = 0,90$, видно, що при нормах осушення $a = 0,5 \dots 0,8$ м – B_{min} у 1,12...1,17 разів менші, а B_{max} у 1,10...1,15 разів більші за

відповідні значення B , які обчислені за середніх значень параметрів за формулою (47).

Аналогічне порівняння за довірчої імовірності $\beta = 0,99$ показує, що B_{min} у 1,18...1,30 разів менші, а B_{max} у 1,16...1,23 разів більші за середні значення B .

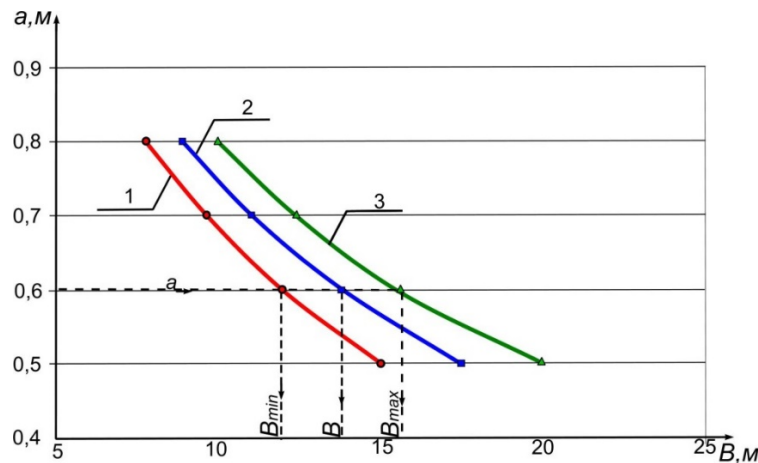


Рис. 4. Графіки залежностей міждренної відстані від норми осушення $B = f(a)$:
1 – $B_{min} = f(a)$; 2 – $B = f(a)$; 3 – $B_{max} = f(a)$

Отже, на основі запропонованого імовірнісного підходу до оцінювання міждренних відстаней для дренажних систем відстані між дренами, які обчислено за формулою (35), можна збільшити в 1,10...1,23 разів (імовірність неперевикнення дорівнює $P_U = 0,90 \dots 0,99$).

Висновки. Міждренна відстань є найбільш інформативним параметром, що визначає інтенсивність водовідведення, проявляє залежність ефективності та вартості дренажної системи від фільтраційних характеристик. З метою вибору чинників, що найбільше впливають на параметри дренажу та модуль дренажного стоку, виконано аналіз гідромеханічних та емпіричних рівнянь з визначення міждренних відстаней.

За результатами проведених статистичних розрахунків визначено, що модуль дренажного стоку, який характеризує інтенсивність осушення територій, а отже, тісно пов'язаний з міждренними відстанями, визначається переважно величиною норми осушення та часу відведення надлишкової вологи. Саме норма осушення найбільше серед п'яти проаналізованих показників впливає на величину міждренної відстані. Питома вага її впливу сягає 84...94 %. Вагомість впливу коефіцієнта фільтрації становить лише 2...4 %. Звідси випливає, що найбільш важливим показником при визначенні відстаней між дренами є модуль дренажного стоку, питома вага якого – 86...98 %.

Запропоновано імовірнісний підхід до оцінювання міждренних відстаней на системах із закритим дренажем. При його застосуванні встановлено, що відстані між регульовальними дренами можна збільшити в 1,10...1,23 рази, що дозволяє отримати значну економію витрат при будівництві систем.

Допускається, що в різних кліматичних зонах і ландшафтах на домінуючій позиції за впливом на міждренну відстань можуть вийти інші чинники та показники. Тому доцільно продовжувати обґрунтування міждренних відстаней за різних умов формування підвищених рівнів ґрунтових вод і призначених норм осушення. Визначення оптимальних параметрів дренажу дуже важливе для встановлення раціональної вартості дренажної системи на етапі її проектування та обумовлено доцільністю розрідження мережі дрен на осушувально-зволожувальних системах у зв'язку з регіональним зниженням РГВ під впливом потепління клімату.

Список використаних джерел

- Вентцель, Е.С. (1969). Теория вероятностей. Москва.
- Гадзала, Я.М., Сташук, В.А., Рокочинський, А.М. (Ред.) (2017). Меліорація та облаштування Українського Полісся. Херсон.
- ДБН В. 2.4–1–99 (1999). Меліоративні системи та споруди. Київ.
- Ивицкий, А.И. (1988). Основы проектирования и расчетов осушительных и осушительно-увлажнительных систем. Минск.
- Ивицкий, А.И., Афанасий, Г.И., Михальцевич, А.И. (1979). Проектирование и расчеты регулирующей сети осушительно-увлажнительных систем на торфяных почвах (рекомендации). Минск.
- Ионат, В.А. (1962). Расчет горизонтального дренажа в неоднородных грунтах. Таллин.
- Козлов, В.С. (1940). Расчет дренажных сооружений. Москва.
- Костяков, А.Н. (1960). Основы мелиорации. Москва.
- Мажайский, Ю.А., Рокочинский, А.Н., Волчек, А.А., Мешик, О.П., Езакх Е. (Ред.) (2017). Природообустройство Полесья. Монография в 4 кн. Кн. 2: Украинское Полесье. ISBN 978-5-00077-654-4.
- Мелиорация и водное хозяйство. (1985). Т.3. Осушение: Справочник. Под ред. Б.С. Маслова. Москва.
- Минаев, И.В. (1985). О расчете расстояний между дренами. *Гидротехника и мелиорация*, 2, 41–44.
- Мурашко, А.И. (1982). Сельскохозяйственный дренаж в гумидной зоне. Москва, 272.
- Науменко, И.И. (1994). Надійність споруд гідромеліоративних систем. Київ.
- Науменко, И.И., Токар, Л.О. (2001). Розрахунок віддалей між дренами осушувально-зволожувальних систем як функції випадкових величин. *Гідромеліорація та гідротехнічне будівництво. Збірник наукових праць*, 26, 83–94.
- Олейник, А.Я. (1981). Геогидродинамика дренажа. Киев.
- Олейник, А.Я., Поляков, В.Л. (1987). Дренаж переувлажненных земель. Киев.
- Писарьков, Х.А. (1978). Гидротехнические мелиорации лесных земель. Москва.
- Поляков, В.Л. (2016). Расчет действия одиночной несовершенной горизонтальной дрены в неограниченном в плане пласте с учетом зоны аэрации. *Гидротехническое строительство*, 5, 21–31.
- Цуман, Н.В. (2014). Оцінка ефективності сучасного використання осушених земель в зоні Полісся. *Науково-практичний журнал. Екологічні науки*, 6, 62–68.
- Шкинис, Ц.Н. (1981). Гидрологическое действие дренажа. Ленинград.
- Янголь, А.М. (1965). Рекомендации по увлажнению осушаемых земель. Киев.
- Chen, X., Wang, D., Chopra, M. (2013). Constructing comprehensive datasets for understanding human and climate change impacts on hydrologic cycle. *Irrigation and Drainage systems Engineering*, 2(1), 106. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000106>.
- Der Pboeg, R.R.V., Kirkham, M.B., Marquardt, M. (1999). The Golding equation for soil drainage: Its origin, evolution and use. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 33–39.
- Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Costescu, I.-A. (2010). Calculation of distance between drains in controlled regime. *Research Journal of Agricultural Science*, 42 (3), 154–160.
- Kovalenko, P., Rokochinskiy, A., Jeznach, J., Volk, P., Koptuyk, R., Prykhodko, N. (2019). Evaluation of climate change in polissia region and ways of adaptation to it. *Journal of Water and Land Development*, 41(1), 72–82. <https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/41/1/article-p77.xml>. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0030>
- Rokochinskiy, A., Volk, P., Pinchuk, O., Turcheniuk, V., Frolenkova, N., Gerasimov, E. (2019). Forecasted estimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands. *Journal of Water and Land Development*, 40(1), 149–153. <https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/40/1/article-p149.xml>. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016>
- Rothe, I. (1863). Strangent fernung bei Draungen. – Land mirtshafliche Jahrbucher, 1924, G.5 DUPUTT J. Etude's theoriques es pratigueussur le movement des caux. Pari.
- Vrugh, J.A., Bouten, W., Gupta, H.V., Hopmans, J.W. (2003). Toward improved identifiability of soil hydraulic parameters: On the selection of a suitable parametric model. *Vadoze Zone Journal*, 2, 98–113.

References

- Chen, X., Wang, D., Chopra, M. (2013). Constructing comprehensive datasets for understanding human and climate change impacts on hydrologic cycle. *Irrigation and Drainage systems Engineering*, 2(1), 106. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000106>.
- DBN V. 2.4–1–99 (1999). Reclamation systems and structures. Kyiv. [in Ukrainian]
- Der Pboeg, R.R.V., Kirkham, M.B., Marquardt, M. (1999). The Golding equation for soil drainage: Its origin, evolution and use. *Soil Science Society of America Journal*, 63, 33–39.
- Gadzala, J.M., Stashuk, V.A., Rokochynsky, A.M. (Eds.) (2017). Land Reclamation and arrangement of Ukrainian Polissya. Collective monograph. Kherson. [in Ukrainian]
- Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Costescu, I.-A. (2010). Calculation of distance between drains in controlled regime. *Research Journal of Agricultural Science*, 42 (3), 154–160.
- Ionat, V.A. (1962). Calculation of horizontal drainage in heterogeneous soils. Tallinn. [in Russian]
- Ivitsky, A.I. (1988). Basics of design and calculation of drainage and drainage-humidification systems. Minsk. [in Russian]
- Ivitsky, A.I., Afanasyk, G.I., Mikhailsevich, A.I. (1979). Design and calculations of the regulatory network of drainage and humidification systems on peat soils (recommendations). Minsk. [in Russian]
- Kostyakov, A.N. (1960). Fundamentals of land reclamation. Moscow. [in Russian]
- Kovalenko, P., Rokochinskiy, A., Jeznach, J., Volk, P., Koptuyk, R., Prykhodko, N. (2019). Evaluation of climate change in polissia region and ways of adaptation to it. *Journal of Water and Land Development*, 41(1), 72–82. <https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/41/1/article-p77.xml>. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0030>
- Kozlov, V.S. (1940). Calculation of drainage structures. Moscow. [in Russian]
- Land reclamation and water management. (1985). Drainage. Handbook. B.S. Maslov (Eds.). Moscow. [in Russian]
- Mazhaisky, Yu.A., Rokochinsky, A.N., Volchek, A.A., Meshik, O.P., Eznakha E. (Eds.) (2017). Nature improvement of Polesie. Monograph in 4 kn. Book. 2: Ukrainian Polesie. ISBN 978-5-00077-654-4. [in Russian]
- Minaev, I.V. (1985). About calculating the distance between drains. *Hydraulic engineering and land reclamation*, 2, 41–44. [in Russian]
- Murashko, A.I. (1982). Agricultural drainage in the humid zone. Moscow. [in Russian]
- Naumenko, I.I. (1994). Reliability of hydro-ameliorative systems. Kyiv. [in Ukrainian]
- Naumenko, I.I., Tokar, L.O. (2001). Calculation of distances between drains of drainage and humidification systems as a function of random variables. *Hydromelioration and hydraulic engineering construction. Collection of scientific works*, 26, 83–94. [in Ukrainian]
- Oleinik, A.Ya. (1981). Drainage geohydrodynamics. Kiev. [in Russian]
- Oleinik, A.Ya., Polyakov, V.L. (1987). Drainage of wetlands. Kiev. [in Russian]
- Pisarkov, Kh.A. (1978). Hydrotechnical reclamation of forest lands. Moscow. [in Russian]
- Polyakov, V.L. (2016). Calculation of the action of a single imperfect horizontal drain in an unlimited reservoir in terms of the aeration zone. *Hydraulic engineering*, 5, 21–31. [in Russian]
- Rokochinskiy, A., Volk, P., Pinchuk, O., Turcheniuk, V., Frolenkova, N., Gerasimov, E. (2019). Forecasted estimation of the efficiency of agricultural drainage on drained lands. *Journal of Water and Land Development*, 40(1), 149–153. <https://content.sciendo.com/view/journals/jwld/40/1/article-p149.xml>. <https://doi.org/10.2478/jwld-2019-0016>
- Rothe, I. (1863). Strangent fernung bei Draungen. – Land mirtshafliche Jahrbucher, 1924, G.5 DUPUTT J. Etude's theoriques es pratigueussur le movement des caux. Pari.
- Shkinkis, Ts.N. (1981). Hydrological drainage action. - Leningrad: Gidrometeoizdat. [in Russian]
- Tsuman, N.V. (2014). Estimation of efficiency of modern use of drained lands in the Polissya zone. *Scientific and practical journal. Environmental sciences*, 6, 62–68. [in Ukrainian]
- Vrugh, J.A., Bouten, W., Gupta, H.V., Hopmans, J.W. (2003). Toward improved identifiability of soil hydraulic parameters: On the selection of a suitable parametric model. *Vadoze Zone Journal*, 2, 98–113.
- Wentzel, E.S. (1969). Probability theory. Moscow. [in Russian]
- Yangol, A.M. (1965). Recommendations for the moistening of drained lands. Kiev. [in Russian]

Надійшла до редакції 19.10.2020

A. Rokochinskiy¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua;
P. Volk¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate prof.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
L. Tokar¹, Cand. Sci. (Tech.), Associate prof.,
E-mail: l.o.tokar@nuwm.edu.ua;
O. Shevchenko², Dr. Sci. (Geol.), Senior Resercher,
E-mail: shevch62@gmail.com;
V. Turchenyuk¹, Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
E-mail: fwg@ukr.net;
L. Volk, Cand. Sci. (Tech.), Associate Prof.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;

¹National University of Water and Environmental Engineering
11 Soborna Str., Rivne, 33000, Ukraine;

²Ukrainian Hydrometeorological Institute NAS of Ukraine,
37 Nauki Ave., Kyiv, 03028, Ukraine

DRAINAGE MODULE – AN IMPORTANT INDICATOR OF THE HYDROLOGICAL EFFECT OF THE DRAINAGE

Filtration calculations of drainage are a fundamental task of reclamation hydrogeology. They are necessary both during irrigation of lands (prevention of salinization) and during their drainage. The most important parameters of closed drainage, as the main means of regulating the level of groundwater and their runoff to water intakes, are the distance between the drains and the depth of drainage. These parameters depend on a combination of hydrogeological, climatic and relief-forming factors. Drainage degree of the territory is characterized by a drainage module. The value of the drainage module provides the water removing from the soil to the required drainage rate for a specified period and is one of the factors of the hydrological effect of the drainage. Existing equations for the calculation of distances between the drains are analyzed. Two methods of calculating agricultural drainage parameters are presented: a hydromechanical method based on theoretical principles of water movement in natural and technical systems and an empirical method based on the statistical data processing of field researches. These methods have both advantages and disadvantages. They include many factors of drainage parameters that represent the technical, economic and environmental effect of drainage. On the basis of the research results, a structural and logical scheme is presented. This scheme describes the influence of hydrological conditions (climatic, soil, relief) and the hydrological effect of drainage on drainage parameters of drained territories. To investigate the influence of variability of the main factors on the distance between the drains, we used the equation with DBN B.2.4-1-99. Also, we took into account the results of the researches of O.J. Olynyk and A.I. Murashko. Methods of statistical modeling and methods of probability theory were also used. Based on these methods, mathematical models have been developed to determine the standard deviation of the function factor. The drainage module, which characterizes the intensity of soil and territory drainage, is formed by the value of drainage rate, filtration rate, and excess water drainage time. Also, the drainage module has a great influence on the distance between the drains (86 % ... 98 %). Based on the probabilistic method of estimating the drainage module, it is calculated that the distance between the drains can be increased by 1.10...1.23 times (probability of non-exceeding $P_U = 0.95...0.99$) without reducing their efficiency.

Keywords: drainage module, distance between the drains, groundwater level, drainage norm, methods of data processing, factors, drainage efficiency

А. Рокочинский¹, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: a.m.rokochinskiy@nuwm.edu.ua;
П. Волк¹, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: p.p.volk@nuwm.edu.ua;
Л. Токар¹, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.o.tokar@nuwm.edu.ua;
А. Шевченко², д-р геол. наук, ст. науч. сотр.,
E-mail: shevch62@gmail.com;
В. Турченко¹, д-р техн. наук, проф.,
E-mail: fwg@ukr.net;
Л. Волк¹, канд. техн. наук, доц.,
E-mail: l.r.volk@ukr.net;
Национальный университет водного хозяйства и природопользования,
ул. Соборная, 11, г. Ровно, 33000, Украина;
Украинский гидрометеорологический институт НАН Украины и ГСЧС Украины,
пр. Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина

МОДУЛЬ ДРЕНАЖНОГО СТОКА КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФЕКТИВНОГО ДЕЙСТВИЯ ДРЕНАЖА

Фильтрационные расчеты дренажа являются основной задачей мелиоративной гидрогеологии. Они необходимы как при орошении земель (предотвращение засоления), так и при осушении. Важнейшими параметрами закрытого дренажа, как основного регулятора уровня грунтовых вод и их стока в водоприемники, является расстояние между дренами и глубина их заложения. Эти параметры зависят от сочетания гидрогеологических, климатических и рельефообразующих факторов. Дренажность территории характеризуется модулем дренажного стока, величина которого обеспечивает отвод лишней воды из почвы до необходимой нормы осушения за определенный период времени и является одним из факторов гидрогеологического действия дренажа. Для определения факторов, которые влияют на расчетные параметры дренажа, проанализированы зависимости для расчета расстояния между дренами, используемые в отечественной и зарубежной практике и относящиеся к двум методам расчета параметров дренажа: гидромеханическому и эмпирическому. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки и отражает сложность и множественность факторов параметров дренажа, которые определяют технический, экономический и экологический эффект его работы. По результатам исследования сформирована и представлена структурно-логическая схема, которая отражает влияние гидрологических условий (климатических, гидрогеологических, рельефных) и проектных показателей эффективного действия дренажа (норма осушения, время, скорость и объемы водоотведения) на его расчетные параметры (модуль дренажного стока, междреннее расстояние, расстояние от оси дрены до водоупоров, диаметр дрены, характеристики фильтра и т.д.). Эти три группы факторов и показателей являются элементами сложной многопараметрической модели. Для исследования влияния изменчивости основных факторов на расстояния между дренами использована общепринятая формула (согласно ДБН В.2.4-1-99) с учетом разработок А.Я. Олейника и А.И. Мурашко, которая достаточно точно учитывает конструктивные особенности материального горизонтального дренажа. Применены методы статистического моделирования и методы теории вероятности, с помощью которых разработаны математические модели. Таким образом, по результатам проведенных исследований установлено, что модуль дренажного стока, который характеризует интенсивность осушения почвы и территории, связанный преимущественно с величинами нормы осушения, коэффициента фильтрации и времени отвода избыточной воды, оказывает существенное влияние на величину расстояния между дренами (86...98 %). Кроме того, на основе предложенного вероятностного способа оценки модуля дренажного стока рассчитано, что расстояния между дренами можно увеличить в 1,10...1,23 раза без существенного уменьшения эффективности их работы.

Ключевые слова: модуль дренажного стока, междреннее расстояние, неустановившееся движение, уровень грунтовых вод, норма осушения, методы расчета, факторы, эффективность действия дренажа.

УДК 502.51:504.5

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.14>

К. Ярошовець, асп.,
E-mail: katerina.yaroshovetseo_33@ukr.net;
О. Ремезова, д-р геол. наук, доц.,
E-mail: elena.titania2305@gmail.com;
Інститут геологічних наук НАН України,
вул. О. Гончара, 55-В, м. Київ, 02000, Україна

ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ТОРФОВИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ

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

Відомо, що сьогодні вміст органічних і неорганічних токсичних домішок у багатьох природних об'єктах у кілька разів перевищує гранично допустиму концентрацію, у результаті чого створюється підвищене рекреаційне навантаження. Стаття присвячена актуальній екологічній проблемі забруднення водойм і ґрунту аварійними розливами нафти та нафтопродуктами. Забруднена вода негативно впливає на людину, водних мешканців, рослини, мікроорганізми та прилеглі до неї території. Наведено особливості забруднення нафтою водних екосистем і розглянуто способи очищення водойм шляхом використання сорбентів. Розглянуто та проаналізовано один з найбільш перспективних і ефективних методів очищення води – сорбційний, з використання рослинної сировини, а саме із застосуванням торфу. Установлена ефективність дії таких сорбентів при ліквідації нафтових забруднень. Проблема очищення водних об'єктів, заміна дефіцитних і дорогих фільтрів із синтетичних та інших матеріалів на більш дешеві й доступні з місцевої сировини набувають нині особливої гостроти та актуальності. Слід зазначити, що отримання даних сорбентів доцільно в екологічному та економічному плані через низьку вартість матеріалів, простоту отримання, високих сорбційних властивостей, можливості утилізації вторинної сировини. Проаналізовано економічну можливість Маневицького району щодо розробки торфяної сировини для подальшого розміщення підприємства з виготовлення торфових сорбентів. Проаналізовано відомості щодо загальнотехнічних властивостей торфу родовища "Коза-Бережина" в Маневицькому районі Волинської області. У статті розглянута еколого-економічна доцільність і запропоновано використання торфу даного регіону при виготовленні нафтосорбентів.

Ключові слова: біосорбент, сорбційний метод, зольність, екологічні наслідки, нафта та продукти переробки, торф, ступінь розкладання.

Постановка проблеми. Сьогодні гостро стоїть питання забруднення навколишнього природного середовища (НПС), що значною мірою пов'язано з негативним впливом органічних і неорганічних речовин, але при цьому саме хімічне забруднення продовжує залишатися глобальною загрозою здоров'ю та життю людей. Забруднення навколишнього середовища нафтою і нафтопродуктами є одним з найбільш масштабних і небезпечних видів впливу людини на об'єкти НПС (Шевчик, Романюк, 2017). Кожен рік тільки на поверхні Світового океану утворюється приблизно 180–240 тис. розливів нафти, що призводить до потрапляння 5–10 млн т нафти і нафтопродуктів у водне середовище (Луньова, Ковбик, 2018). Отже, практично 30 % площі Світового океану покрито нафтовою плівкою. Так, наприклад, за 9 місяців 2016 р. в морських портах було зареєстровано 12 фактів забруднення акваторії нафтопродуктами. Екологи стверджують, що 1 т нафти здатна покрити площу до 12 км², що може призвести до загибелі флори і фауни на забрудненій території (Луньова, Ковбик, 2018). За даними TINA Consultants (компанія, що займається запобіганням витоків нафти в різних областях) за останні 10 років з кожного добутого чи збереженого мільйона тонн нафти близько 3 т потрапляє у водне середовище (Алексеев, 2017). При цьому на водній поверхні утворюється плівка, яка веде до масштабної біодеградації водойми і прилеглих берегових територій, у результаті чого руйнується природна екосистема (Бойченко та ін., 2015).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом, у зв'язку зі складною ситуацією із навколишнім середовищем більшість науковців проводять дослідження сорбційних властивостей різноманітних природних сорбентів з попередньою обробкою або без неї. Серед науковців, які досліджують дане питання, слід виділити таких: С.А. Геворгян, С.С. Айрапетян, Д.А. Мартиросян (2018); Н.В. Гревцев, А.Г. Шампаров, Д.Р. Якупов (2017); А.А. Оржеховський (2017); Б.Н. Житенев, Д.Д. Сенчук (2019); А.С. Мазур, Т.В. Украинцева, Л.В. Костюк (2014); Е.Ф. Лозинская, Н.И. Косолапова, А.В. Смородько, Т.Н. Митракова (2015). Проте проведено недостатньо науково-практичних досліджень, що стосуються властивостей торфів України.

Метою даної роботи є обґрунтування еколого-економічної доцільності застосування біосорбентів для ліквідації наслідків розливу нафти.

Завданнями статті є:

- проаналізувати ефективність застосування біосорбентів при ліквідації наслідків розливу нафти;
- виконати еколого-економічне обґрунтування запропонованого підходу;
- проаналізувати властивості торфу Волинської області для подальшого використання як сорбційного матеріалу.

Виклад основного матеріалу. Небезпечність нафтопродуктів як техногенних забруднювачів зумовлюється здатністю вуглеводнів утворювати токсичні сполуки в ґрунтах, поверхневих і підземних водах. У ґрунтах, забруднених нафтою та нафтопродуктами (ННП), порушується екологічна рівновага в ґрунтовій системі, відбувається зміна морфологічних і фізико-хімічних характеристик ґрунтових горизонтів, змінюються водно-фізичні властивості ґрунтів, порушується співвідношення між окремими фракціями органічної речовини ґрунту, знижується продуктивність земель тощо.

Особливої шкоди завдають нафта і нафтопродукти водоймам, вони утворюють на поверхні води плівку, що перешкоджає газообміну між водою та атмосферою і знижує вміст у воді кисню (Бойченко та ін. 2015). Відомо, що нафтопродукти у воді можуть бути в різних формах: розчинені, емульговані, сорбовані на зважених частинках і донних відкладах, у вигляді плівки на поверхні води. Потрапляння мастила та нафтопродуктів у природні водойми проявляється у зміні фізичних властивостей води: поява неприємних запахів, присмаку; змінюється забарвлення, поверхневий натяг, в'язкість; відбуваються зміни хімічного складу (Бойченко, Черняк, 2015). Покриваючи найтоншою плівкою величезні ділянки водної поверхні, вуглеводні нафти знижують кількість розчиненого кисню за рахунок зменшення газообміну. Подальше зниження кількості розчиненого кисню провокує біодеградацію водойми. Дослідниками доведено, що швидкість нагромадження нафтопродуктів у результаті техногенного забруднення у водних екосистемах далеко випереджає швидкість їхньої біодеградації природним

шляхом, а існуючі технології не справляються з такими забрудненнями швидко та ефективно.

Існують декілька методів ліквідації розливу нафти і нафтопродуктів: механічний; термічний; фізико-хімічний; біологічний. З існуючих методів найбільш розповсюдженими і доцільними є використання фізико-хімічних методів. З наукової точки зору уваги заслуговує сорбційний спосіб очищення води від нафтопродуктів, оскільки його застосуванням тягне найбільш швидко й ефективну ліквідацію нафтової плями з мінімальним збитком для навколишнього природного середовища. Сорбційні методи базуються на зміні фізичного стану забруднювачів. Як результат, одержують нетоксичні або менш токсичні сполуки. Особливо широко ці методи використовуються для очищення багатокомпонентних стічних вод з низькою концентрацією забруднювачів (Луньова, Ковбик, 2018).

Для локалізації розливів ННП обґрунтовано застосування різних порошкоподібних, тканинних або бонових сорбуючих матеріалів. Сорбенти при взаємодії з водною поверхнею починають негайно вбирати ННП, максимальне насичення досягається в період перших десяти секунд (якщо нафтопродукти мають середню щільність), після чого утворюються грудки матеріалу, насиченого нафтою.

Спосіб нанесення сорбенту на водну поверхню та під нафтову пляму – за допомогою розпилювача бункерного типу з використанням носія повітря (комплектуються компресором) або води (комплектуються насосом). Освоєно виробництво сорбентів багаторазового користування для збирання розлитої нафти (нафтопродуктів) з поверхні води, ґрунту аж до видалення райдужної плівки. Сорбенти утримуються на поверхні води, не тонуть, добре сорбують нафту за температури від 0 до 30 °С.

Випускаються в різній формі – рулонах, матах, серветках, і використовуються залежно від умов. Мати армовані волокнами з поліпропілену і призначені для використання як плавучих нафтопоглинаючих бонових загорджен (тралів) різної конструкції. Сорбційна ємність становить 15–20 кг нафти на 1 кг адсорбенту. Регенерація (віджим нафти) до 10 циклів знижує ємність на 1–2 кг. Загальний обсяг збирання нафти – на 1 кг адсорбенту до 150 кг нафти. Використані сорбенти можуть застосовуватися як паливо, гідроізоляційний матеріал.

Найбільш складним у технологічному аспекті є очищення водних поверхонь від плаваючої нафти з допомогою гідрофобних плаваючих сипких сорбентів – збирачів. Зазвичай нафтосорбент пневматичним пристроєм розпорошується на забруднену водну поверхню і після поглинання нафти збирається механічними засобами, наприклад сітчастим черпаком або спеціальним сепаратором. Незважаючи на отримання первинного екологічного ефекту – розриву суцільного плівкового забруднення, сорбції розчинених та емульгованих нафт, сорбенти мають і суттєвий недолік – вимагають збирання та утилізації, які не завжди на практиці здійсненні (Назаренко, Архіпова, 2016).

Ліквідація нафтових забруднень – завдання оперативного реагування. Чим швидше розпорошити сорбент над поверхнею, тим ефективніше пройде адсорбція нафтопродукту, тим менше буде площа нафтової плями. Це пов'язано з тим, що товщина шару нафти залишається досить великою.

Можливо безпечне і нескладне подальше збирання, і недорогоговартісна утилізація:

- спалюванням, як паливо для ТЕС і міні-ТЕС з метою отримання теплової енергії на діючих енергетичних установках без їхнього переобладнання (Бондарець, Матвєєва, 2014);

- як пластифікуючого компонента при виробництві дорожніх покриттів;

- як компонента для виробництва протифільтраційних екранів;

- захоронення на звалищі.

Таким чином, усі способи утилізації відпрацьованого адсорбенту є екологічно безпечними для навколишнього природного середовища, тварин і людей і не вимагають істотних витрат.

Для видалення нафти і нафтопродуктів з водної поверхні та ґрунту, для очищення водних акваторій від вуглеводневих плівок, очищення стічних вод за наявності в них нафтопродуктів універсальний сорбент повинен мати такі якості й властивості:

- високу сорбційну здатність відносно нафти і НП;
- високу утримувальну здатність;
- мінімальний час поглинання основної маси розливів;
- можливість регенерації поглиненого продукту;
- доступність;
- нетоксичність;
- наявність достатніх сировинних ресурсів (Бондарець, Матвєєва, 2014);
- екологічність;
- технологічність виготовлення й утилізації сорбенту;
- мінімальні витрати на транспортування та зберігання (Назаренко, 2016).

Нині у світі виробляється або використовується близько 200 видів сорбентів для ліквідації забруднень нафтового походження, які можна класифікувати за різними ознаками: походженням, дисперсністю, призначенням, за способом утилізації. Якість сорбентів визначається головним чином їхньою ємністю відносно нафти, ступенем гідрофобності, плавучістю після сорбції нафти або нафтопродуктів, можливістю десорбції, регенерації або утилізації сорбенту (Матвєєва та ін., 2012).

У зв'язку із цим досить актуальним є застосування як адсорбентів матеріалів природного походження, а саме торфових сорбентів. Перспектива практичного використання торфу та інших гумусоподібних речовин для очищення стічних вод заснована на тому, що ці природні сполуки широкодоступні, нетоксичні, дешеві, технологія їхнього добутку проста. Застосування торфу як поглинача визначається універсальністю його властивостей адсорбенту. Хоч зв'язувальна здатність торфу відносно багатьох забруднень стічних вод нижче, ніж у ряді адсорбентів, однак низька вартість робить його в багатьох випадках конкурентоспроможним із цими адсорбентами.

У сучасних екологічних умовах недоцільно розглядати торф лише як паливо і добрив – це питання ставилося дослідниками ще за часів існування СРСР. Глибока і комплексна переробка торфу дозволяє отримувати на виході цілий спектр матеріалів (Дегтярев, 2016), які можуть використовуватися в сільському господарстві, медицині, будівництві, хімічній промисловості, як ізоляційних матеріалів, кормових добавок тощо і найголовніше – як біосорбентів.

Торф – це перш за все природний адсорбент гідрофільного типу, який здатний поглинати і утримувати вологу. Поряд з іншими природними адсорбентами (глина, ґрунт) торф можна віднести до неоднорідно-пористих адсорбентів. Використання торфу як адсорбенту визначається насамперед його мікроструктурою і дисперсністю, пористістю, досить високою питомою поверхнею. Активність торфу, що застосовується для очищення стічних вод, може бути підвищена при обробці його різними методами. Найкращий результат отримано при обробці торфу кислотами – при цьому збільшується його адсорбційна ємність.

Саме торф і його продукти переробки можна успішно використовувати як сорбенту з метою видалення нафто-

вих розливів. Розробка торф'яних сорбентів для видалення нафти і нафтопродуктів з поверхні води та ґрунту може стати ефективною технологією забезпечення безпеки навколишнього середовища. Інтенсивне впровадження заходів, направлених на заміну традиційних для області видів палива на природний газ, і масова газифікація сільських населених пунктів, особливо у віддалених районах області, викликало зменшення обсягів реалізації та, як наслідок, скорочення обсягів випуску торфопродукції.

Досліджувана Волинська область належить до найбільш заболочених областей України. Згідно з номенклатурним списком ґрунтів області торфові ґрунти (торфово-болотні та торфовища низинні) охоплюють 244,3 тис. га або 12,9 % її території. Ґрунтовий покрив на родовищі "Коза-Березина" представлений комплексом торфово-болотних і малозольних низинних неглибоких і середньоглибоких торфовищ провінції Полісся Західне. Торфовища низинні розповсюджені на площі 163,6 тис. га. Вони є природним ресурсом, а також матеріальною базою для проведення економічної діяльності.

До Державного фонду родовищ торфу віднесено 109 родовищ області. Запаси цих родовищ оцінені за промисловими категоріями ($A + C_1 + C_2$) у тис. тонн: балансові – 227702, позабалансові – 34363. Загальна площа родовищ у нульовій межі – 93750 га, промисловій – 60664 га. Резерв становлять 172 родовища з перспективними ресурсами 169658 тис. т і загальною площею в нульовій межі – 89139 га, у промисловій – 60664 га.

Усього в області до Державного фонду родовищ торфу і його резерву віднесено 281 родовище із загальною площею в межах промислової глибини 119820 га. Охоронний статус мають 17 родовищ, загальна площа їх становить 17580 га, ресурси – 37367 тис. т. У природному стані є 52 родовища, їхня загальна площа в нульовій межі – 27026 га, промисловій – 19752 га, запаси 56831 тис. т, прогнозні ресурси – 57762 тис. т, площа 60329 га. За запасами торфу Волинська область займає 1 місце в Україні (20 % державних). Заторфованість району – 7,4 %, що є найбільшим показником на території України. У Маневському районі розташовано 29 родовищ торфу, із них 15 родовищ оцінені за промисловими категоріями, а 14 віднесені до резерву. Промислові запаси становлять 40769 тис. т, ресурси – 10518 тис. т.

Маневський район володіє значними запасами торфу, які оцінюються в 51,3 млн т, до них входять загальні запаси Волинської частини родовища "Коза-Березина" в

кількості 1,432 млн т. Корисна копалина родовища належить до осокового типу трав'яної групи, трясавинного підтипу низинного типу. Загальна площа торфових родовищ – 22566 га. Мінерально-сировинна база торфу в Маневському районі є найпотужнішою в області. На ній працює два торфобрикетні заводи державного підприємства "Волиньторф" при річному видобутку – 200 тис. т торфу. Потенційні можливості забезпечення їх сировиною оцінюють як достатньо високі. На сьогодні, у зв'язку з відпрацюванням окремих торфових ділянок, виникла потреба в залученні нових родовищ торфу, а саме родовища "Коза-Березина" як об'єкта планової діяльності (Звіт..., 2019).

Видобуток торфу є перспективним для використання як палива, у сільському господарстві та при виготовленні біосорбентів. Останнім часом приділяється досить значна увага державних органів, надається державна підтримка, прийнято низку законодавчих актів, які стосуються розвитку альтернативних видів енергії. Таким чином, розробка торфового родовища "Коза-Березина" в Маневському районі Волинської області є економічно доцільною та екологічно достатньо безпечною.

Розв'язання проблеми комплексного використання торфу має ґрунтуватися на використанні всіх цінних компонентів і властивостей. Його хімічний склад зумовлює адсорбційну здатність поглинати із газів і рідин різні речовини. Торф – це перш за все природний іонообмінник. Основними фізико-хімічними (технічними) показниками торфу є: вологість, кислотність, зольність, теплота згоряння, ступінь розкладу, вологоємність, пористість, структура, теплопровідність, об'ємна маса, хімічний склад (Линно та ін., 1998).

У роботі проаналізовано показники якості низинного та перехідного торфу родовища "Коза-Березина" в Маневському районі Волинської області для подальшого використання при виготовленні сорбенту, що, у свою чергу, має велике значення для навколишнього середовища. Характеристику торфу наведено в табл. 1.

За результатами лабораторних робіт встановлено, що торф поділяється на два типи: перехідний та низинний:

- перехідний – це торф трясавинного підтипу, трав'яно-мохової й трав'яної групи;
- низинний – це торф трясавинного підтипу, очеретяно-осокової й деревинно-трав'яної групи (Геолого-економічна оцінка..., 2016).

Таблиця 1

Показники якості торфу родовища "Коза Березина" за результатами лабораторних робіт

	Найменування	Перехідний	Низинний
1	Ступінь розкладання, %	39,1	28,1
2	Природна вологість, %	89,1	90,4
3	Зольність, %	10,0	12,1
4	Азот загальний	2,822	3,09
5	Ємність поглинання аміаку	0,992	0,86
6	Фосфор загальний	0,119	0,567
7	Середня кислотність водної витяжки (P_H)	5,3	5,2
8	Вміст гумінових кислот (загальний)	76,69	63,07
9	Середній вміст солей заліза (Fe_2O_3)	0,51	0,90
10	Середній вміст солей кальцію	3,89	2,75
11	Вміст гумінових кислот	76,79	63,07
12	Середня кислотність (pH)	5,3	5,2

Кислотність торфу є важливою ознакою його технічних властивостей. Вона відіграє велику роль при вивченні природних особливостей торфу, його генезису, є одним із факторів інтенсивності мікробіологічної діяльності. Поглинальна здатність торф'яного адсорбенту залежить від pH, найбільша ефективність адсорбенту – при pH = 5, тобто в кислому середовищі поглинальна

здатність зростає, при pH = 10 ефективність такого сорбенту знижується. При зниженні pH зростає ефективність очищення на 10–12 %, на території родовища показник кислотності притаманний для даного типу торфу – слабокислий (5,2–5,3). Що стосується зольності торфу, то він є в межах норми і становить 10–12,1 %. Ступінь розкладання залежить від вологості торфу, чим

вища вологість, тим нижче ступінь розкладу. Максимальне значення ступеня розкладення торфу двох видів зафіксовано в перехідному типі й становить 39,1.

Висновки. У результаті діяльності людини відбувається різке погіршення якості води у водних об'єктах, природні водоймища втрачають здатність до самоочищення. Серед ефективних методів очищення водойм від нафтопродуктів варто віддати перевагу органічним та органіко-мінеральним сорбентами, ураховуючи їхню екологічну чистоту, безпечність, широку сировинну базу, високу нафтоємність порівняно з невисокою вартістю. На сьогоднішній день існує велика кількість науково-практичних розробок щодо шляхів і методів зменшення або ліквідації нафтового забруднення. Для очистки водних об'єктів від нафти та НП використовують різні механічні, фізико-хімічні та біологічні методи. Але проблема продовжує існувати, не втрачаючи своєї актуальності, тому існує необхідність удосконалення широкого спектра методів і матеріалів, які були б особливо ефективними при операціях очищення та видалення нафти на забруднених територіях.

Природно-кліматичні умови розглянутого регіону досить сприятливі як для розробки торф'яного родовища, так і для виробництва сорбентів, яке дозволяє організувати наявна інфраструктура. Оцінка ресурсів, проведена за матеріалами геологічної розвідки, доводить, що Волинська область має достатньо ресурсів для виробництва сорбентів для ліквідації нафтових розливів на основі торфу із місцевої сировини. Рациональне використання природних ресурсів включає в себе комплексний підхід до їхнього застосування. Використання торфових ресурсів дозволяє комплексно розв'язувати не лише проблеми в сільському господарстві та інших галузях, але й досягнути екологізації в технологіях очищення природних об'єктів.

Використання торф'яних ресурсів Волинської області для виготовлення біосорбентів дозволить зменшити небезпеку для навколишнього середовища та мінімізувати забруднення водойм нафтою і нафтопродуктами. Одержані результати дозволяють продовжити детальне вивчення торфу даного регіону для подальшого практичного використання як сорбента для розв'язання екологічних проблем.

Список використаних джерел

- Алексеева, А.А. (2017). Применение листового опада в качестве основы сорбционного материала при ликвидации аварийных разливов нефти с поверхности воды. *Дис. ... канд. техн. наук: 03.02.08. "Экология (в химии и нефтехимии)".* Казань.
- Артюх, Е.А., Мазур, А.С., Украинцева, Т.В., Костюк, Л.В. (2014). Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти. *Известия СПбГТИ(ТУ)*, 26, 58–66.
- Бойченко, С.В., Черняк, Л.М., Радомська, М.М., Бондарук, А.В. (2015). Проблема очищения природных водойм, забруднених стічними водами об'єктів сфери нафтопродуктозабезпечення. *Науковий вісник Національного університету імені Тараса Шевченка*, 2, 353–357.
- Бондарець, Ю.В. (2013). Аналіз технологій ліквідації нафторозливів із застосуванням сорбентів на основі торфового моху роду *Sphagnum*. *Проблеми екологічної біотехнології*, 1.
- Бондарець, Ю.В., Матвеева, О.Л., Безверха, Д.А. (2014). Проблема забрудненості водних об'єктів нафтопродуктами та шляхи її вирішення. *Проблеми екологічної біотехнології*, 2.
- Булгакова, О.Л., Рожкова, Д.С., Хадкевич, І.А. (2014). Удаление нефтяных разливов при помощи торфяного сорбента в арктических условиях. *Новосибирск: ИГТ СО РАН*, 251–254.
- Веприкова, Е.В., Терещенко, Е.А., Чесноков, Н.В. (2010). Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, 5, 285–304.
- Гаврилов, С.В., Канарская, З.А. (2015). Адсорбционные свойства торфа и продуктов его переработки. *Вестник Казанского технологического университета*, 2, 422–427.
- Геолого-економічна оцінка родовища торфу "Коза-Березина" в Маневичському районі Волинської області. (2016). Отримано з http://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shift.rdf&schifr=65273
- Дегтярев, К.С. (2016). Торф – недооцененный ресурс России. *Журнал "Сантехника, отопление и кондиционирование"*, 3, 26–33.

Звіт з оцінки впливу на довкілля планової діяльності у сфері користування надрами з метою видобування торфу КП "Волинськприродресурс" на родовищі "Коза-Березина" Маневичького району Волинської області. (2019). Отримано з <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/4377/reports/UgzUS1rL9R.pdf>

Казанок, А.В., Матвеева, О.Л. (2014). Очищення нафтозабруднених стічних вод за допомогою біосорбентів. *Науковий вісник Національного університету імені Тараса Шевченка*, 1, 131–134.

Линно, В.Ю., Герашенко, О.А., Суворов, В.И. (1998). Ионнообменно-сорбционные материалы на основе торфа. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, 156–157.

Луньова, В., Ковбик, А. (2018). Дослідження ефективності поглиначів нафтопродуктів, які використовують при ліквідації аварій. *Матеріали конференції "Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості"*, 465–468.

Матвеева, О.Л., Демянко, Д.О., Огдандська, І.О. (2012). Аналіз проблем та перспектив використання методів очищення нафтовмісних стічних вод. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*, 41, 181–186.

Матвеева, О.Л., Демянко, Д.О., Копиленко, А.В., Шараєв, К.О. (2012). Ефективність застосування сорбентів при очистці забруднених вод. *Харківська промисловість*, 162–166.

Назаренко, С.К., Архипова, Л.М. (2016). Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник ІНТУНГ*, 1, 72–79.

Чуйченко, Л.М., Матвеева, О.Л. (2013). Аналіз технологій очищення нафтовмісних стічних вод авіаприємств з використанням біосорбентів. *Проблеми екологічної біотехнології*, 1, 1–11.

Шевчик, Л.З., Романюк, О.І. (2017). Аналіз біологічних способів відновлення нафтозабруднених ґрунтів. *Scientific Journal "ScienceRise: Biological Science"*, 1, 31–39.

Ямансарова, Э.Т., Хасанова, Д.Н., Абдуллин, М.И., Громыко, Н.В. (2016). Экономические аспекты применения сорбентов на основе сельскохозяйственных отходов для очистки природных вод от нефти и продуктов на ее основе. *Научный журнал НИУ ИТМО. Серия "Экономика и экологический менеджмент"*, 1, 118–122.

References

- Alekseeva, A.A. (2017). Primenenie listovogo opada v kachestve osnovy sorbionnogo materiala pri likvidacii avarijnyh razlivov nefi s poverhnosti vody. *Thesis ... Cand. Sci. (Tech.): 03.02.08. "Jekologija (v himii i neftehimii)".* Kazan'. [in Russian]
- Artjuh, E.A., Mazur, A.S., Ukraineva, T.V., Kostjuk, L.V. (2014). Perspektivy primeneniya biosorbentov dlja ochistki vodoemov pri likvidacii avarijnyh razlivov nefi. *Izvestija SPbGTI(TU)*, 26, 58–66. [in Russian]
- Bojchenko, S.V., Chernjak, L.M., Radomska, M.M., Bondaruk, A.V. (2015). Problema ochyshhennja pryrodnykh vodojm, zabrudnennykh stichnyjmi vodamy ob'ektiv sfery naftoproduktovozabezpechennja. *Naukojemi tekhnologiji*, 2, 353–357. [in Ukrainian]
- Bondarec, Ju.V. (2013). Analiz tekhnologij likvidacii naftorozliviv iz zastosuvannjam sorbentiv na osnovi torfovogho mokhu rodu *Sphagnum*. *Problemy ekolohichnoji biotekhnologiji*, 1. [in Ukrainian]
- Bondarec, Ju.V., Matvejeva, O.L., Bezverka, D.A. (2014). Problema zabrudnenosti vodnykh ob'ektiv naftoproduktamy ta shlyakhy jiji vyreshennja. *Problemy ekolohichnoji biotekhnologiji*, 2. [in Ukrainian]
- Bulgakova, O.L., Rozhkova, D.S., (2014). Hadkevich I.A. Udalenie nefjanyh razlivov pri pomoshhi torfjanogo sorbenta v arkticheskijh uslovijah. *Novosibirsk: INGG SO RAN*, 251–254. [in Russian]
- Chujchenko, L.M., Matvejeva, O.L. (2013). Analiz tekhnologij ochyshhennja naftovmisnykh stichnykh vod aviapriyemstv z vykorystannjam biosorbentiv. *Problemy ekolohichnoji biotekhnologiji*, 1, 1–11. [in Ukrainian]
- Degtyarev, K.S. (2016). Torf – nedoocenjonnyj resurs Rossii. *Zhurnal Santehnika, otopenie i kondicionirovanie*, 3, 26–33. [in Russian]
- Gavrilov, S.V., Kanarskaja, Z.A. (2015). Adsorbicijnyje svojstva torfa i produktov ego pererabotki. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta*, 2, 422–427. [in Russian]
- Geologho-ekonomichna ocinka rodovyssha torfu "Kozha-Berezyna" v Manevycjkomu rajoni Volynskoj oblasti. (2016). Retrieved from http://geoinf.kiev.ua/wp/geologichni-zviti.php?rep=fnd_shift.rdf&schifr=65273 [in Ukrainian]
- Jamansarova, Je.T., Hasanova, D.H., Abdullin, M.I., Gromyko, N.V. (2016). Jekonomicheskie aspekty primeneniya sorbentov na osnove sel'skohozjajstvennyh othodov dlja ochistki pryrodnjkh vod ot nefi i produktov na ee osnove. *Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Serija "Jekonomika i jekologicheskij menedzhment"*, 1, 118–122. [in Russian]
- Kazanok, A.V., Matvejeva, O.L., (2014). Ochyshhennja naftozabrudnennykh stichnykh vod za dopomoghoju biosorbentiv. *Naukojemi tekhnologiji*, 1, 131–134. [in Ukrainian]
- Linno, V.Ju., Gerashhenko, O.A., Suvorov, V.I. (1998). Ionoobmenno-sorbicijnyje materialy na osnove torfa. *Gornij informacijno-analiticheskij bjulleten' (nauchno-tehnicheskij zhurnal)*, 156–157. [in Russian]
- Lunjoa, V., Kovbyk, A. (2018). Doslidzhennja efektyvnosti pohlynachiv naftoproduktiv, jaki vykorystovujutj pry likvidacii avarij. *Materijali konferenciji "Postup v nafto ghazopererobnij ta naftokhimichnij promyslovosti"*, 465–468. [in Ukrainian]
- Matvejeva, O.L., Demjanko, D.O., Oghdandska, I.O. (2012). Analiz problem ta perspektiv vykorystannja metodiv ochyshhennja naftovmisnykh stichnykh vod. *Visnyk Dnipropetrovs'kogho nacional'nogho universytetu zaliznychnogho transportu imeni akademika V. Lazaryana*, 41, 181–186. [in Ukrainian]
- Matvejeva, O.L., Demjanko, D.O., Kopylenko, A.V., Sharajev, K.O. (2012). Efektyvnistj zastosuvannja sorbentiv pry ochystci zabrudnennykh vod. *Kharkova promyslovistj*, 162–166. [in Ukrainian]

Nazarenko, S.K., Arkhypova, L.M. (2016). Suchasni metody likvidaciji avarijnykh rozlyviv nafty na vodnykh ob'ekтах sukhodolu. *Naukovyj visnyk IFNTUNGh*, 1, 72–79. [in Ukrainian]

Shevchik, L.Z., Romanyuk, O.I. (2017). Analysis of biological methods of restoration of oil-contaminated soils. *Scientific Journal "Science Rise: Biological Science"*, 1, 31–39. [in Ukrainian]

Veprikova, E.V., Tereshhenko, E.A., Chesnokov, N.V. (2010). Osobennosti ochistki vody ot nefteproduktov s ispol'zovaniem neftyanyh

sorbentov, fil'trujushhih materialov i aktivnyh uglej. *Jurnal of Siberian Federal University. Chemistry*, 5, 285–304. [in Russian]

Zvit z ocinky vplyvu na dovkilja planovoji djialnosti u sferi korystuvannja nadramy z metodu vydobuvannja torfu KP "Volynjpryrodrures" na rodovysshi "Kozza-Berezyna" Manevyc'kogho rajonu Volyn'skoji oblasti. (2019). Retrieved from <http://eia.menr.gov.ua/uploads/documents/4377/reports/UgzUS1rL9R.pdf> [in Ukrainian]

Надійшла до редколегії 14.08.2020

E. Yaroshovets, PhD student,

E-mail: katerina.yaroshovetseo_33@ukr.net;

E. Remezova, Dr. Sci. (Geol.), Assoc. Prof.,

E-mail: elena.titania2305@gmail.com;

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine,

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

ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF THE PEAT SORBENTS USAGE FOR SOLVING ENVIRONMENTAL PROBLEMS

It is known that currently the content of organic and inorganic toxic impurities in natural objects is several times higher than the maximum allowable concentration, resulting in increased recreational load. The article is devoted to the topical ecological problem of water and soil pollution by emergency oil spills and oil products. Contaminated water has a negative effect on humans, aquatic life, plants, microorganisms and adjacent areas. Peculiarities of oil pollution of aquatic ecosystems are given and methods of water treatment by use of sorbents are considered. One of the most promising and effective methods of water purification - sorption, using vegetable raw materials, peat - is considered and analyzed. The effectiveness of such sorbents in the elimination of oil pollution has been established. The problem of cleaning water bodies, replacing scarce and expensive filters from synthetic and other materials with cheaper and more available from local raw materials are now becoming particularly acute and relevant. It should be noted that obtaining these sorbents is expedient in environmental and economic terms due to the low cost of materials, easiness of production, high sorption properties, the possibility of recycling. The economic possibility of Manevychi district for the development of peat raw materials for further placement of the enterprise for the production of peat sorbents is analyzed. Information on general technical properties of peat of Kozza-Berezyna deposit in Manevychi district of Volyn region is analyzed. The article considers the ecological and economic feasibility and proposes the use of peat in the region in the production of oil sorbents.

Keywords: biosorbent, sorption method, ash content, ecological consequences, oil and refined products, peat, degree of decomposition.

Е. Ярошовец, асп.,

E-mail: katerina.yaroshovetseo_33@ukr.net;

Е. Ремезова, д-р геол. наук, доц.,

E-mail: elena.titania2305@gmail.com;

Институт геологических наук НАН Украины,

ул. О. Гончара, 55, в, г. Киев, 02000, Украина

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОРФЯНЫХ СОРБЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

Известно, что в настоящее время содержание органических и неорганических токсичных примесей во многих природных объектах в несколько раз превышает предельно допустимую концентрацию, в результате чего создается повышенная рекреационная нагрузка. Посвящено актуальной экологической проблеме загрязнения водоемов и почвы аварийными разливами нефти и нефтепродуктами. Рассмотрены особенности загрязнения нефтью водных экосистем и способы очистки водоемов путем использования сорбентов. Рассмотрен и проанализирован один из самых перспективных и эффективных методов очистки воды – сорбционный с использованием растительного сырья, а именно торфа. Установлена эффективность действия таких сорбентов при ликвидации нефтяных загрязнений. Замена дефицитных и дорогих фильтров из синтетических и других материалов на более дешевые и доступные (из местного сырья) приобретает в настоящее время особую остроту и актуальность. Следует отметить, что использование данных сорбентов целесообразно в экологическом и экономическом плане благодаря низкой стоимости материалов, простоты получения, высоких сорбционных свойств, возможности утилизации вторичного сырья. Проанализирована экономическая возможность разработки торфяного сырья и дальнейшего размещения предприятия по изготовлению торфяных сорбентов в Маневичском районе. Проанализированы сведения об общетехнических свойствах торфа месторождения "Коза-Березина" в Маневичском районе Волынской области. Рассмотрено эколого-экономическую целесообразность и предложено использование торфа данного региона для изготовления сорбентов.

Ключевые слова: биосорбент, сорбционный метод, зольность, экологические последствия, нефть и продукты переработки, торф, степень разложения.

ГЕОЛОГІЧНА ІНФОРМАТИКА

УДК 550.832+550.834

DOI: <http://doi.org/10.17721/1728-2713.92.15>D. Malytskyy¹, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof.
E-mail: dmalytskyy@gmail.com;D. Mikesell^{1,2}, PhD, Prof,E-mail: DylanMikesell@boisestate.edu;¹Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics, NAS of Ukraine,
3-b Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine;²The Department of Geosciences at Boise State University,
1910 University Drive, Boise, Idaho, 83725 The USATHE DETERMINATION OF SOURCE MECHANISMS OF SMALL EARTHQUAKES
BY MOMENT TENSOR INVERSION

(Представлено членом редакційної колегії д-ром фіз.-мат. наук, проф. Б.П. Масловим)

A method is presented for moment tensor inversion of only direct P-waveforms registered at only one station and a limited number of stations. The method is based on an inversion approach described in where a version of the matrix method has been developed for calculation of direct P-waves in horizontally layered half-space from a point source represented by its moment tensor. We describe a procedure for retrieving the source mechanism of small earthquakes based on interactive inversion of seismograms and demonstrate its application to two local earthquakes in the Boise region. The moment tensor inversion of seismogram data in this study is based on a point source model. The process includes generation of synthetic seismograms using the matrix method for an elastic, horizontally-layered, medium. In the paper, a method is presented for moment tensor inversion of only direct P-waves, which are less sensitive to path effects than reflected and converted waves. This approach significantly improves the inversion method accuracy and reliability. A point-source approximation is considered, with known location and origin time. Based on forward modeling, a numerical technique is developed for the inversion of observed waveforms for time history of the components of moment tensor $M(t)$, obtained by generalized inversion.

Keywords: seismic moment tensor, source mechanism, small earthquakes, matrix method.

Introduction. Earthquake source mechanisms are of prime importance in the monitoring of local, regional and global seismicity, because they reflect the stress pattern acting in the area under study and may help to map its tectonic structure. On a global scale, sources of information are large and moderate earthquakes that occur in active tectonic regions and are recorded by seismic stations worldwide. Techniques for analyzing these data are well established, that is, from first motion polarity readings analysis to waveform modelling of surface and long period body waves (Langston and Helmberger, 1975; Given et al., 1982; Dziewonski and Woodhouse, 1983; Nabelek, 1984; Sipkin, 1986). Advantages of such teleseismic studies included the availability of recording stations that cover the source region and the simplicity of waveforms and structures involved at low frequencies. At regional and local scales however, the scope for such studies is limited due to the limited number of recording stations and their spatial distribution. This leads to a problem in obtaining reliable source information from regions where the majority of earthquakes are small. As a result of the wide deployment of highly sensitive digital seismic instruments, high quality waveform data from small earthquakes can now be obtained from regional or local networks. However, data from such networks are not simple to analyze. Reasons for this include the influence of heterogeneous structure between the source and the recording station and the significant amount of high frequency energy in the signal.

In general, the observed seismograms contain information about the source, the path and the recording instrument. The practical problem is to isolate information about the source by correcting for the path and instrument effects. The effect of the instrument is easily removed because the instrumental response is known, on the other hand, isolating the path effect relies on the (assumed) linear relationship between the observed ground displacement and the seismic moment tensor density (Gilbert, 1970; Stump and Johnson, 1977; Aki and Richards, 1980; Jost and Herrmann, 1989). In practice, however, complete isolation of the path effect has proved difficult because a simple point source approach and flat layered structure model are not always good approximations,

especially for high frequency data (Lay and Wallace, 1995). As propagation effects can never be fully excluded, they give rise to mislocation of the hypocenter and spurious source complexities. To address the above problem, various approaches have been developed based on moment tensor inversion in the time or frequency domain (Saikia and Herrmann, 1985; Kim, 1987; Fan and Wallace, 1991; Koch, 1991, a; Arvidsson and Kulhanek, 1994; Arvidsson, 1996; Zhu and Helmberger, 1996; Shomali and Slunga, 2000; Singh et al., 2000). These methods differ mainly in the nature of the problem that sets the a priori constraints. In trying to minimize the influence of the crustal structure, which is normally associated with a time-shift of the various phases in a seismogram, different segments of the seismogram, that is, P, S, Rayleigh, Love etc., have been modelled separately (Zhao and Helmberger, 1994; Nabelek and Xia, 1995). The advantage of this approach is that each phase is aligned using its onset time instead of the origin time. The various phase shifts obtained can then be used to correct for the crustal structure. Assuming that direct P and S phases from shallow events at close epicentral distances are less affected by crustal structure, Schurr and Nabelek (1999) managed to obtain mechanisms for the aftershock sequence of the 1993 Scotts Mills event. Apart from modelling different segments of seismograms mentioned above, simultaneous inversion of both the source and the structure has been applied on full trace high frequency data in weakly heterogeneous structure (Sileny et al., 1992; Sileny and Psencik, 1995). In this approach, both the hypocenter and the structure are allowed to vary in a limited sense in order to obtain the best fit between the observed and synthetic data. In areas of strong lateral heterogeneity the approach has been modified by the use of different source-receiver propagation structures that produce the best fit (Mao et al., 1994; Sileny et al., 1996; Singh et al., 2000).

Ferdinand and Arvidsson (2002) used an interactive inversion approach to demonstrate the retrieval of the source parameters of three small earthquakes and developed a modified model of structure along the propagation path. Due to significant variation of structure through out the Mbeya local network (Camelbeeck and Iranga, 1996), a single station approach was used. Using

trial and error, the initial structure along the propagation path was modified to obtain the best fit between observed and synthetic data. The final single station solution was then used to generate synthetics for forward modelling of the seismograms at other stations where the event was recorded. Deviations between synthetics and observed data allowed them to deduce structural differences along the various propagation paths. Moment tensor inversion was carried out by minimizing the L2 norm of the difference between synthetic and observed displacement data under a deviatoric condition. Results for the three small earthquakes showed good agreement between single station and multistation source solutions.

Currently, moment tensors are calculated by several approaches: using amplitudes of seismic waves (Vavrychuk and Kuhn, 2012; Godano et al., 2011), S/P amplitude ratios (Hardebeck and Shearer, 2003), or full waveforms (Mai et al., 2016; Weber, 2006, 2016). The inversion of full waveforms is a widely used approach applicable on all scales: from small to large earthquakes.

In this study, a method is presented for moment tensor inversion of only direct P- and/or S-waves, which are less sensitive to path effects modelling than reflected and converted waves, which significantly improves the method's accuracy and reliability. Based on forward modeling, a numerical technique is developed for the inversion of observed waveforms for the components of the moment tensor $\mathbf{M}(t)$, obtained by generalized inversion. Addressing the problem of unavoidable inaccuracy of seismic waves modelling, we propose to invert only the direct P- and/or S-waves instead of the full field. An advantage of inverting only the direct waves consists in their much lesser distortion, if compared to reflected and converted waves, by inaccurate modelling of velocity contrasts. Thus, the direct waves, consequently, have a much less distorted imprint of the source. An advantage, in this connection, of choosing the matrix method for calculation of the wave field consists in its ability to analytically isolate only the direct waves from the full field.

Methodology. Our approach is limited to the far field approximation of a point source. Following Aki and Richards (1980), if a point source equivalent of the extended source is assumed, the n -th component of the ground displacement U_n at an arbitrary position r at time t can be expressed as

$$U_n(t) = G_{nk,j}(t) \otimes M_{kj}(t), \quad (1)$$

where $G_{nk,j}$ is the j th spatial derivative of the far-field elastodynamic Green's function $G_{nk}(r, x, t)$ for the Earth between the source and receiver; M_{kj} is the moment tensor at the hypocenter point x and $\otimes$ denotes temporal convolution. Assuming that all components of M_{kj} in (1) have the same time dependence, say $s(t)$, (1) becomes

$$U_n(t) = M_{kj}(G_{nk,j}(t) \otimes s(t)), \quad (2)$$

where M_{kj} is now a set of constants and $s(t)$ is the source time function. The intention is to use observed ground displacements U_n to infer properties of the source as characterized by M_{kj} .

A method, presented here, enables one to obtain the focal mechanism solution by inversion of waveforms recorded at only one station. The inversion scheme consists of two steps. First (forward modeling), propagation of seismic waves in vertically inhomogeneous media is considered and a version of matrix method for calculation of synthetic seismograms on the upper surface of the horizontally layered isotropic medium is developed. The point source is located inside a layer and is represented with seismic moment tensor. The displacements on the upper surface are presented in matrix form in the frequency and wave number domain, separately for the far-field and the near-field (Malytskyy, 2010, 2016; Malytskyy and Kozlovskyy, 2014; Malytskyy and D'Amico, 2015).

Subsequently, only the far-field displacements are considered and the wave-field from only direct P- and S-waves is isolated with application of eigenvector analysis reducing the problem to system of linear equations (Malytskyy, 2016). Subsequently (inverse modeling), spectra of the moment tensor components are calculated using a solution of generalized inversion and transformed to time domain by applying the inverse Fourier transform.

1. Forward modelling. Assuming that the point source, represented by a symmetric moment tensor $\mathbf{M}(t)$, is located within a stack of solid, isotropic, homogeneous, perfectly elastic layers with horizontal and perfectly contacting interfaces, the layers characterized by thickness, density, and velocities of P- and S-waves, the following expressions have been obtained by Malytskyy (2010, 2016) in cylindrical coordinates for the displacements $u_z^{(0)}(t, r, \varphi)$, $u_r^{(0)}(t, r, \varphi)$ and $u_\varphi^{(0)}(t, r, \varphi)$ on the upper surface of the half-space at $z=0$:

$$\begin{pmatrix} u_z^{(0)} \\ u_r^{(0)} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^3 \int_0^\infty k^2 \mathbf{I}_i L^{-1} [m_i \mathbf{g}_i] dk, \\ u_\varphi^{(0)} = \sum_{i=5}^6 \int_0^\infty k^2 J_i L^{-1} [m_i g_{\varphi i}] dk, \quad (3)$$

where

$$\begin{aligned} m_1 &= M_{xz} \cos \varphi + M_{yz} \sin \varphi, \quad m_2 = M_{zz}, \\ m_3 &= \cos^2 \varphi \cdot M_{xx} + \sin^2 \varphi \cdot M_{yy} + \sin 2\varphi \cdot M_{xy}, \\ m_4 &= -\cos 2\varphi \cdot M_{xx} + \cos 2\varphi \cdot M_{yy} - 2 \sin 2\varphi \cdot M_{xy}, \\ m_5 &= M_{yz} \cos \varphi - M_{xz} \sin \varphi, \\ m_6 &= \sin 2\varphi \cdot M_{xx} - \sin 2\varphi \cdot M_{yy} - 2 \cos 2\varphi \cdot M_{xy}, \end{aligned} \quad (4)$$

M_{xx} , M_{xy} , ..., M_{zz} are the Cartesian components of the moment tensor $\mathbf{M}(\omega)$ representing the source located at $r=0$, axis x pointing North and y East; φ is the station's azimuth (Fig. 1); k is the horizontal wave number; functions $\mathbf{g}_i = (g_{zi}, g_{ri})^T$ and $g_{\varphi i}$ contain propagation effects between the source and the receiver (Malytskyy, 2010,

2016); $\mathbf{I}_1 = \begin{pmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_0 \end{pmatrix}$, $\mathbf{I}_2 = \begin{pmatrix} J_0 & 0 \\ 0 & J_1 \end{pmatrix}$, $\mathbf{I}_3 = \mathbf{I}_2$, $J_5 = J_0$, $J_6 = J_1$ are the Bessel functions of argument kr , and L^{-1} is the inverse Laplace transform, from frequency to time domain.

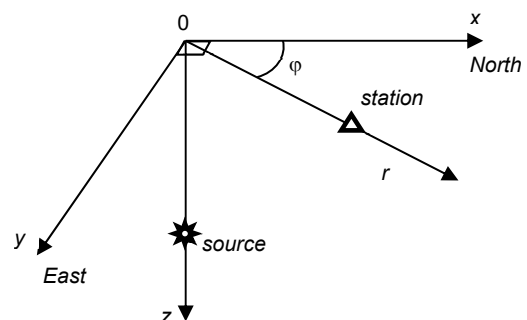


Fig. 1. Cylindrical and Cartesian coordinates of the source and the station

Further, only the far-field displacements are considered and the wave-field from only direct P- and S-waves is isolated with application of eigenvector analysis reducing the problem to system of linear equations (Malytskyy, 2016). The Eq. (3) is then expressed in matrix form for only the direct P- and S-waves on the upper surface of the half-space in frequency and wave number domain (ω, k) (Malytskyy, 2010):

$$\mathbf{U}^{(0)} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{M}, \quad (5)$$

where vector $\mathbf{U}^{(0)} = (U_x^{(0)P}, U_x^{(0)S}, U_y^{(0)P}, U_y^{(0)S}, U_z^{(0)P}, U_z^{(0)S})^T$ contains the six Cartesian displacement components of direct P- and S-waves; vector $\mathbf{M} = (M_{xx}, M_{yy}, M_{zz}, M_{xy}, M_{yz}, M_{zx})^T$ consists of the six independent Cartesian components of moment tensor $\mathbf{M}$, matrix $\mathbf{K}$ accounting for path effects and transformations between the Cartesian and cylindrical coordinates:

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{11}^P & K_{12}^P & K_{13}^P & K_{14}^P & K_{15}^P & K_{16}^P \\ K_{21}^S & K_{22}^S & K_{23}^S & K_{24}^S & K_{25}^S & K_{26}^S \\ K_{31}^P & K_{32}^P & K_{33}^P & K_{34}^P & K_{35}^P & K_{36}^P \\ K_{41}^S & K_{42}^S & K_{43}^S & K_{44}^S & K_{45}^S & K_{46}^S \\ K_{51}^P & K_{52}^P & K_{53}^P & K_{54}^P & K_{55}^P & K_{56}^P \\ K_{61}^S & K_{62}^S & K_{63}^S & K_{64}^S & K_{65}^S & K_{66}^S \end{pmatrix}.$$

When only the direct P-waves are used, matrix $\mathbf{K}$ reduces to

$$\mathbf{K}^P = \begin{pmatrix} K_{11}^P & K_{12}^P & K_{13}^P & K_{14}^P & K_{15}^P & K_{16}^P \\ K_{21}^P & K_{22}^P & K_{23}^P & K_{24}^P & K_{25}^P & K_{26}^P \\ K_{31}^P & K_{32}^P & K_{33}^P & K_{34}^P & K_{35}^P & K_{36}^P \end{pmatrix}.$$

Thus, the Eq. (5) can be written only for the direct P-waves in the matrix form:

$$\mathbf{U}^{(0)P} = \mathbf{K}^P \cdot \mathbf{M}, \quad (6)$$

where $\mathbf{U}^{(0)P} = (U_x^{(0)P}, U_y^{(0)P}, U_z^{(0)P})^T$ defines the observed amplitudes of the direct P-waves, and the components of matrix $\mathbf{K}^P$ are

$$\begin{aligned} K_{11}^P &= \cos^2 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{r1}^P dk, \\ K_{12}^P &= \cos \varphi \sin \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{r1}^P dk, \\ K_{13}^P &= \cos \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r2}^P dk, \\ K_{14}^P &= \cos^3 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{15}^P &= \cos \varphi \sin^2 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{16}^P &= \cos \varphi \sin 2\varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{21}^P &= \sin \varphi \cos \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{r1}^P dk, \\ K_{22}^P &= \sin^2 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{r1}^P dk, \\ K_{23}^P &= \sin \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r2}^P dk, \\ K_{24}^P &= \cos^2 \varphi \sin \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{25}^P &= \sin^3 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{26}^P &= \sin \varphi \sin 2\varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{31}^P &= \cos \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{z1}^P dk, \\ K_{32}^P &= \sin \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_1(kr)}{2\pi j} g_{z1}^P dk, \\ K_{33}^P &= \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{z2}^P dk, \\ K_{34}^P &= \cos^2 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{35}^P &= \sin^2 \varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{r3}^P dk, \\ K_{36}^P &= \sin 2\varphi \cdot \int_0^\infty \frac{k^2 J_0(kr)}{2\pi j} g_{z3}^P dk. \end{aligned}$$

2. *Inversion modeling.* Now, that a direct relation between the moment tensor and the displacements on the free surface of the half-space is defined by Eq. (6), the moment tensor can be determined from the displacements by inverting the relation.

A least-squares solution to the over-determined system of Eq. (6) for $\mathbf{M}$ (for there are $3 \times k \times \omega$ equations in total for $6 \times \omega$ unknowns) can be obtained by generalized inversion (Aki and Richards, 2002):

$$\mathbf{M} = (\tilde{\mathbf{K}}^P \mathbf{K}^P)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}^P \mathbf{U}^{(0)P}, \quad (7)$$

where the tilda denotes complex conjugation and transposition, and $-\mathbf{1}$ inversion and $(\tilde{\mathbf{K}}^P \mathbf{K}^P)^{-1} \tilde{\mathbf{K}}^P$ is the generalized inverse of $\mathbf{K}^P$.

Thus, since all the six independent components of moment tensor $\mathbf{M}$ contribute to the waveforms $\mathbf{U}^{(0)}$ at only one station in the over-determined system of Eq. 6, the inversion scheme of Eq. 7 should enable, at least theoretically, to obtain a unique solution for each of them. Within the limitations of the current source presentation and path effects modeling, the solution is exact and convergence is reached after a single iteration. The inverse problem in this case consists of determining the parameters of point source under the condition that the source location and origin time is known, as well as the distribution of velocities of seismic waves between the source and the station.

Eq. (6) can be expressed in matrix form for direct P-waves at N stations ($i = 1, \dots, N$) in the spectral domain:

$$\mathbf{G}\mathbf{M} = \mathbf{U}_n^{(0)P}$$

$$\mathbf{G} = \begin{pmatrix} K_1^P \\ \vdots \\ K_N^P \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{U}_n^{(0)P} = (U_1^{(0)P}, U_2^{(0)P}, \dots, U_N^{(0)P})^T$$

The vector $\mathbf{M}$ of moment time functions is obtained using the generalized inversion.

$$\hat{\mathbf{M}} = (\tilde{\mathbf{G}}^* \mathbf{G})^{-1} \tilde{\mathbf{G}}^* \mathbf{U}_n^{(0)P}$$

Application. In this section, the proposed inversion method is tested by applying it to two earthquakes from the Southeast Idaho region in the USA: one of them (event 1) has a known focal mechanism and the second (event 2) – has a unknown focal mechanism. 1D crustal model used in all the inversions of waveforms is listed in Table 1. The duration of direct P-waves at a station is estimated visually from the records, and accounting for the delays of reflection-conversion phases at the station corresponding to the model

(Table 1) at a respective epicentral distance and source depth (Pang *et al.*, 2018).

Table 1
1D crustal model used in this study (Shemeta, 1989)

Depth, km	Velocity V_p , km/s	Velocity V_s , km/s
0.0	4.75	2.73
2.74	5.72	3.31
8.85	6.06	3.57
19.10	6.80	3.89
41.10	8.00	4.57

Fig. 2 shows the observed seismograms for the event 1 at stations AHID (42.77N, -111.10E) and IMW (43.89N, -

110.94E) and for the event 2 at stations HLID (42.56N, -114.41E) and MFID (43.42N, -115.83E). Table 2 gives location parameters and magnitudes of these events. The components of moment tensor $M(t)$ were obtained for the earthquake of 2017/09/02 (event 1) by inverting its direct P-wave forms at only the station AHID (at epicentral distance of 32 km) (Fig. 3, a) and at only at the stations: AHID (at epicentral distance of 32 km) and IMW (at epicentral distance of 144 km) (Fig. 3, b). The components of moment tensor $M(t)$ were obtained for the earthquake of 2019/05/16 (event 2) by inverting its direct P-wave forms at only the stations: HLID (at epicentral distance of 114 km) and MFID (at epicentral distance of 178 km).

Events used in this study

Event number	Date	Latitude	Longitude	Depth (km)	Magnitude	Origin time (UTC)
1	2017/09/02	42.65°N	-111.45°E	9.50	MW5.3	23:56:52.00
2	2019/05/16	44.578°N	-114.298°E	6.91	ML2.4	09:08:57.00

Table 2

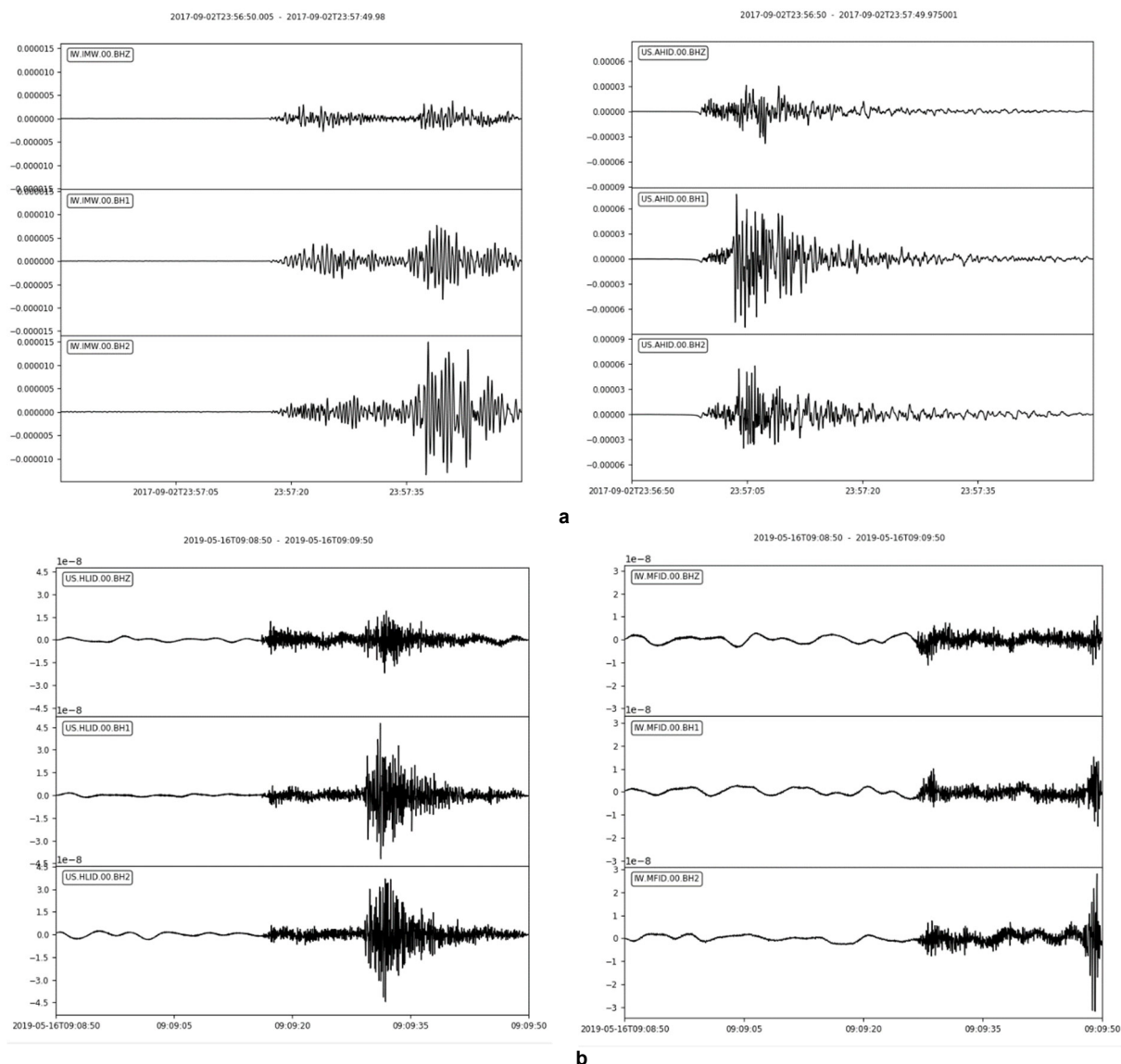


Fig. 2. a – The waveforms (seismograms) recorded at stations AHID (42.77N, -111.10E) and IMW (43.89N, -110.94E) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000aekg/executive>, event 1) after transform to displacements;
b – The waveforms (seismograms) recorded at stations HLID (42.56N, -114.41E) and MFID (43.42N, -115.83E) (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/mb80344114/executive>, event 2) after transform to displacements. These records were used for a determination of seismic tensor by inversions of waveforms (see Fig. 3 and Fig. 5) using direct P-waves

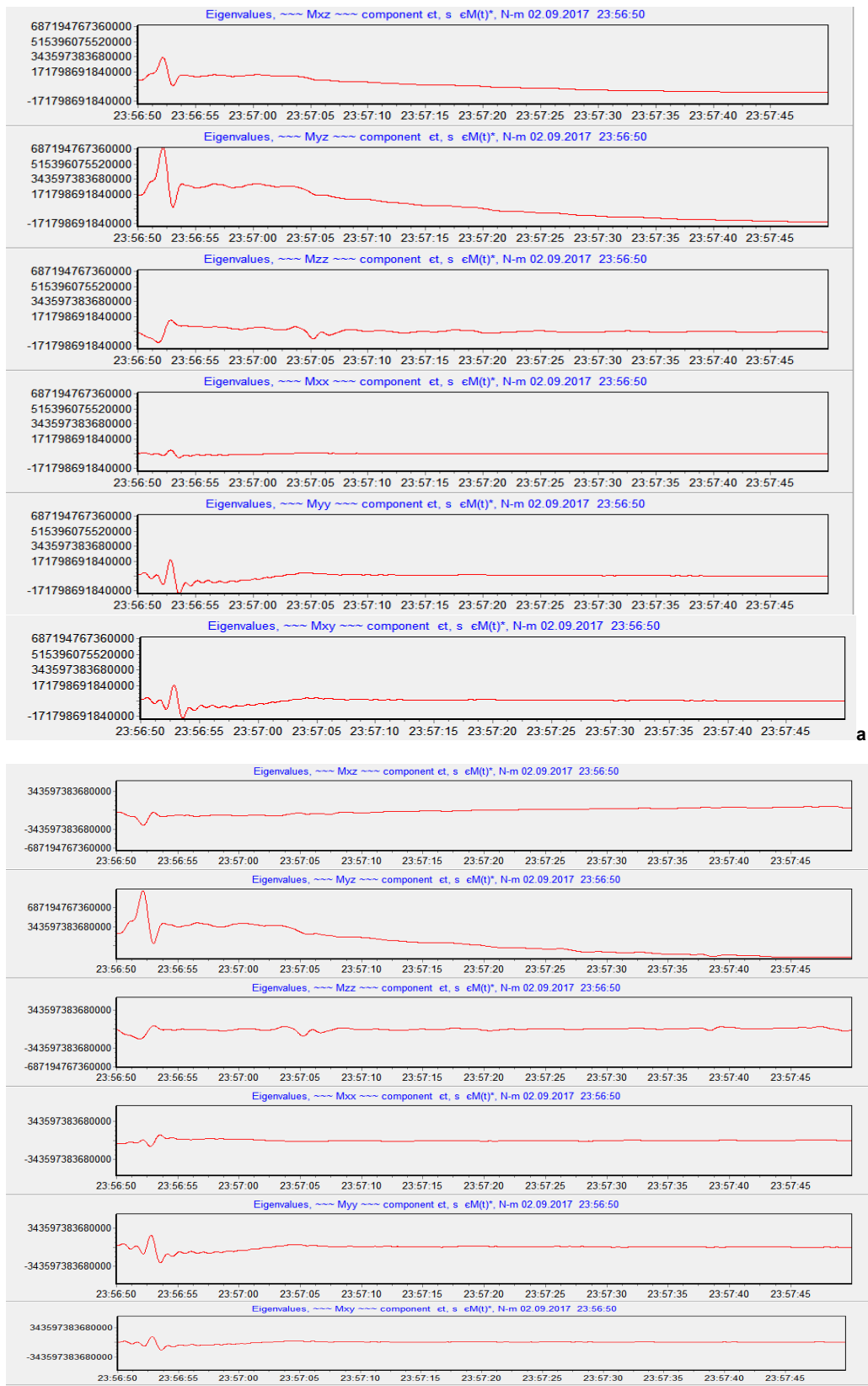


Fig. 3. a – components of moment tensor $M(t)$ obtained for the earthquake of 2017/09/02 (event 1) in the Idaho region by inversion of its direct P-wave forms only at the station AHID; b – at the stations AHID and IMW

Moment tensor components resulting from the inversion of only direct P-wave forms at only the station AHID (Fig. 3, a) and the inversion of only direct P-wave forms at the stations AHID and IMW (Fig. 3, b) and the corresponding versions of focal mechanism for the event 1 are shown in Fig. 4.

Moment tensor components resulting from the inversion of only direct P-wave forms at the stations HLID and MFID (Fig. 5) and the corresponding version of focal mechanism for the event 2 are shown in Fig. 6.

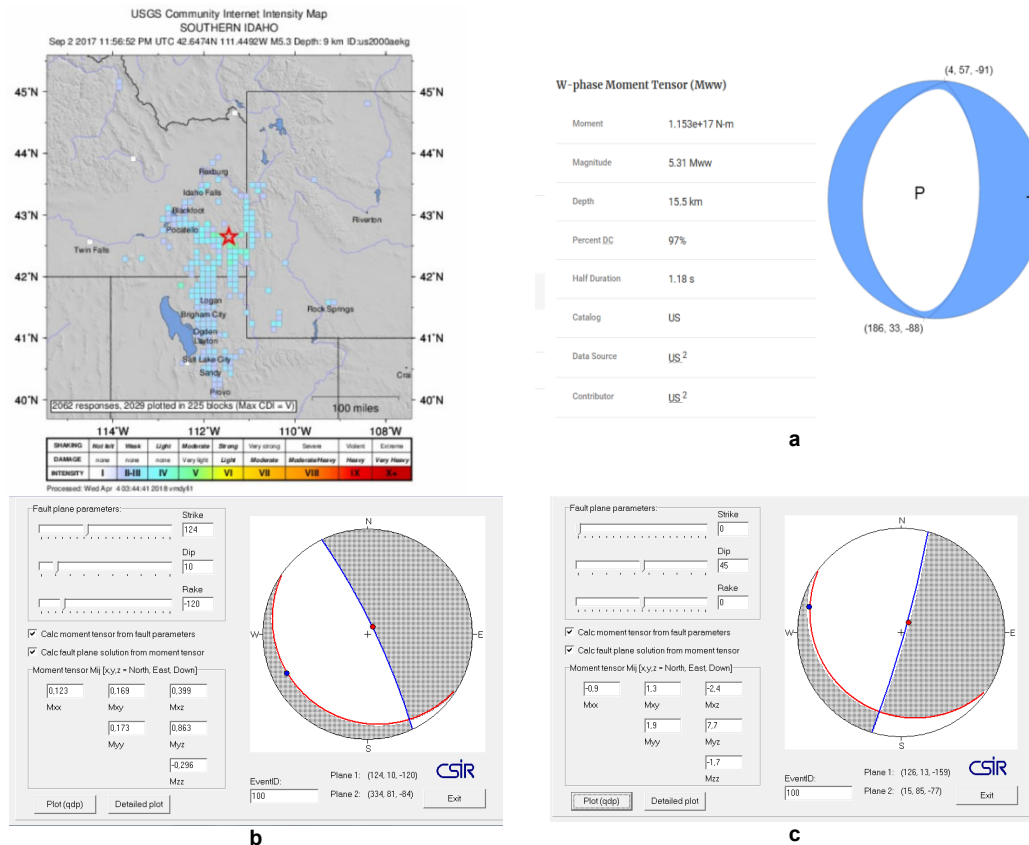


Fig. 4. Versions of focal mechanism for the earthquake that occurred on 2017/09/02 in the Idaho region

($t_0 = 23:56:52.00$ (UTC), $h_s = 9.50$ km, $\phi = 42.65^\circ$ N, $\lambda = -111.45^\circ$ E, $M_w = 5.3$):

a – from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000aekg/executive>;

b – corresponding to components of seismic tensor obtained by the proposed inversion of waveforms at only station AHID (42.77N, -111.10E) (see Fig. 3, a); c – corresponding to components of seismic tensor obtained by the proposed inversion of waveforms at stations:

AHID (42.77N, -111.10E) and IMW (43.89N, -110.94E) (see Fig. 3, b)

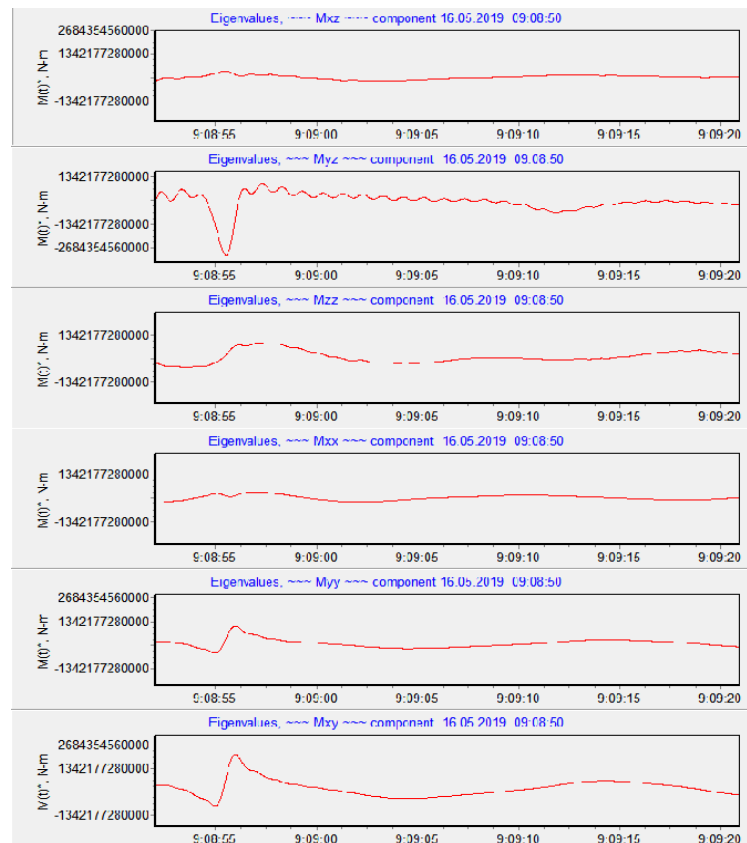


Fig. 5. Components of moment tensor $M(t)$ obtained for the earthquake of 2019/05/16 in the Western Idaho region (event 2) by inversion of direct P-wave forms at the stations HLID and MFID

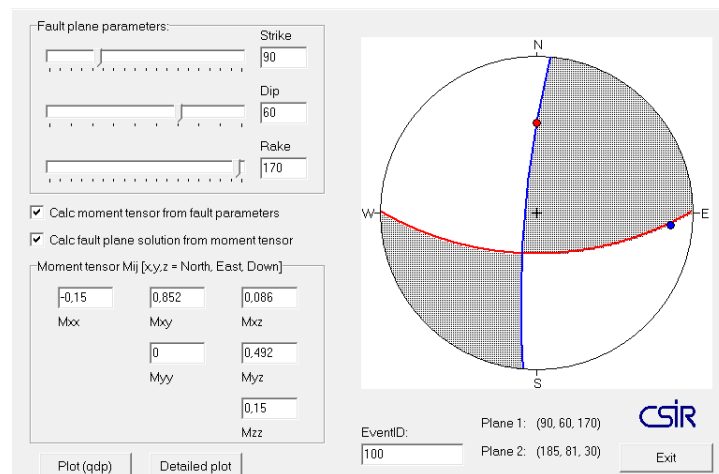


Fig. 6. Version of focal mechanism for the earthquake that occurred on 2019/05/16 in the Idaho region ($t_0 = 09:08:57.00$ (UTC), $h_s = 6.91$ km, $\varphi = 44.578^\circ\text{N}$, $\lambda = -114.298^\circ\text{E}$, $M_L = 2.4$ – corresponding to components of seismic tensor obtained by the proposed inversion of waveforms at stations: HLID (42.56N, -114.41°E) and MFID (43.42N, -115.83°E) (see Fig. 5)

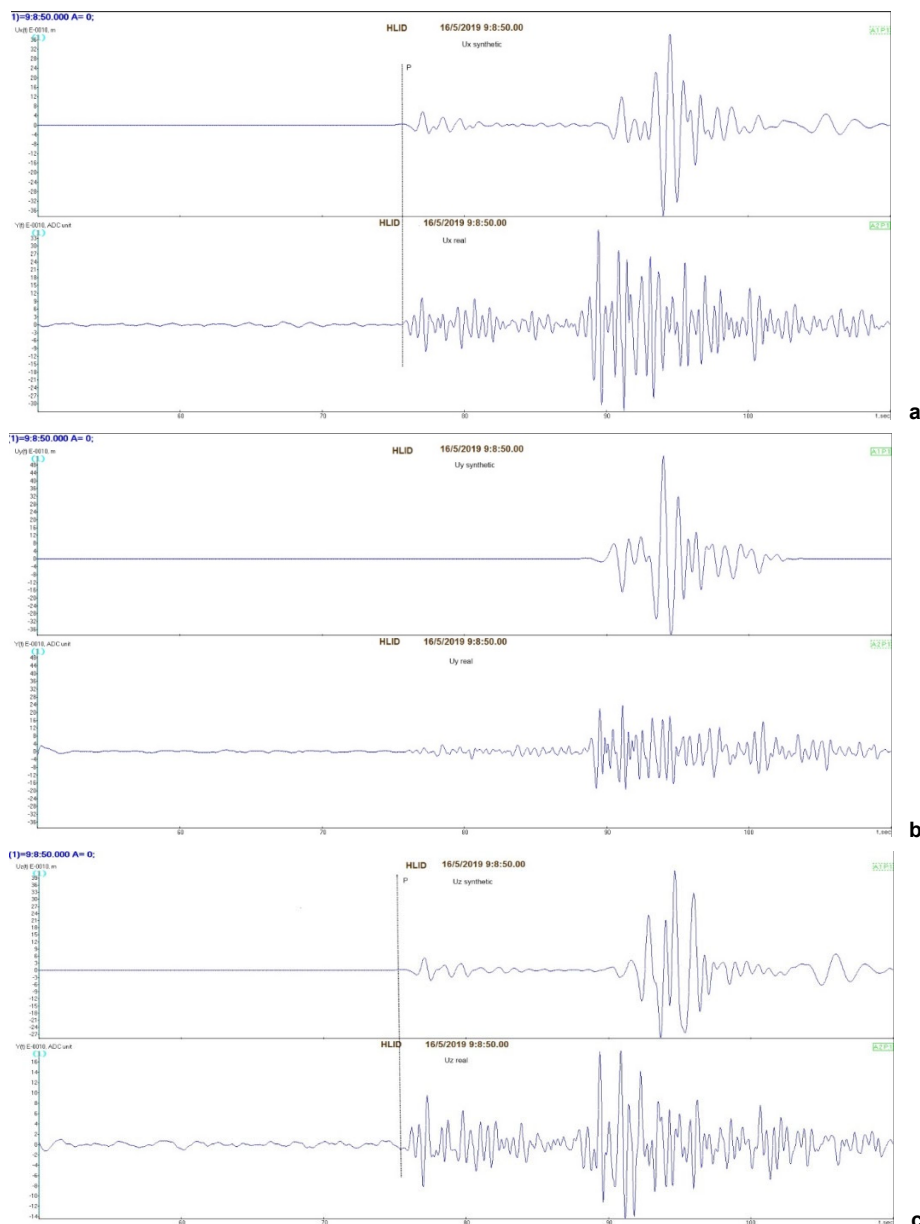


Fig. 7. Displacement seismograms at the station HLID (a – displacement at x-component; b – displacement at y-component; c-displacement at z-component) calculated by matrix method using the moment tensor $M(t)$ determined for the earthquake of 2019/05/16 (Fig. 6) and the 1D crustal model listed in Table 1 (upper graphics) and the seismograms observed at the station (down graphics). Markers show the arrive of P-wave. The seismograms are filtered in the range 0.5–2.0 Hz

Discussion. In the paper, a possibility is explored of retrieving the components of seismic moment tensor from only direct P-wave forms at single station or at several stations. It is theoretically shown that the displacements at every single point on the upper surface of horizontally layered and perfectly elastic half-space generated by the point source represented by time-varying symmetric moment tensor depend on all of its six components, which can therefore be retrieved by inverting the dependence. Choosing to invert only the direct P-waves, calculated by matrix method, instead of the full field, enables to reduce the effects of the half-space model inaccuracy, reflected and converted phases being much more distorted by it.

The assumption of horizontally layered half-space, as well as the distribution of seismic velocities in it, may however turn out grossly incorrect in fact. Combined with inaccurate knowledge of source location and origin time, as well as with a number of the other uncertainties, such as introduced by seismic noise in the observed seismograms etc., it may almost completely obscure the source imprint in the seismograms, and especially in those originating, as it is, from only one station, turn the moment inversion ill-defined and lead to an intractable solution. That is why some independent means of control are needed for the results of any single station (and/or limited number of stations) inversion.

With this aim, we first propose to compare the mechanisms independently determined for the same earthquake from its waveforms at different single stations. For the earthquake of 2017/09/02 (event 1) they turn out almost indistinguishable between the stations AHID and (AHID and IMW) (Fig. 4), which at least means that despite all the uncertainties the unique solution exists and is reproducible. Next, synthetic waveforms at the stations HLID are calculated using the mechanism determined for the earthquake of 2019/05/16 (event 2) and compared with the waveforms observed at the station, the synthetics and observables appearing to correlate well in horizontal component U_x and in vertical U_z although slightly less in horizontal component U_y (Fig. 7). Finally, focal mechanism solutions for the earthquake of 2017/09/02 determined here by inversion of waveforms (Fig. 4, b, c) are compared from <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000aekg/executive> (Fig. 4, a).

Conclusions. In the paper, a method is presented for moment tensor inversion of only direct P-waveforms registered at only one station and a limited number of stations. The method is based on an inversion approach described in (Malytskyy 2010, 2016) where a version of the matrix method has been developed for calculation of direct P-waves in horizontally layered half-space from a point source represented by its moment tensor. Using the method presented in the current paper, focal mechanisms of the two earthquakes from the Idaho region of USA are retrieved. The mechanisms independently determined for the same earthquake from its waveforms at different single stations turned out almost identical (event 1). A conclusion is drawn out that the method will be useful when focal mechanisms cannot be obtained by other methods, the problem typical for the regions with low seismicity and insufficient number of seismic stations.

References

- Aki, K., Richards, P.G. (1980). Quantitative Seismology: Theory and Methods. Vol. I. San Francisco: W.H. Freeman.
- Arvidsson, R. (1996). Fennoscandian earthquakes: Whole crustal rupturing related to postglacial rebound. *Science*, 274, 744–746.
- Arvidsson, R., Kulhanek, O. (1994). Seismodynamics of Sweden deduced from earthquake focal mechanisms. *Geophys. J. Int.*, 116, 377–392.
- Camelbeeck, T., Iranga, M.D. (1996). Deep crustal earthquakes and active faults along the Rukwa trough, eastern Africa. *Geophys. J. Int.*, 124, 612–630.

- Langston, C.A., Helmberger, D.V. (1975). A procedure for modelling shallow dislocation sources. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 42, 117–130.
- Dziewonski, A., Woodhouse, J. (1983). An experiment in the systematic study of global seismicity: Centroid moment tensor solutions for 201 moderate and large earthquakes of 1981. *J. geophys. Res.*, 88, 3247–3271.
- Fan, G., Wallace, T. (1991). The determination of source parameters for small earthquakes from a single, very broadband seismic station. *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1385–1388.
- Ferdinand, R.W., Arvidsson, R. (2002). The determination of source mechanisms of small earthquakes and revised models of local crustal structure by moment tensor inversion. *Geophys. J. Int.*, 151, 221–234.
- Gilbert, F. (1970). Excitation of the normal modes of the Earth by earthquake sources. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 22, 223–226.
- Given, J., Wallace, T., Kanamori, H. (1982). Teleseismic analysis of the 1980 Mammoth Lakes earthquake sequence. *Bull. seism. Soc. Am.*, 72, 1093–1109.
- Godano, M., Bardainne, T., Regnier, M., Deschamps, A. (2011). Moment tensor determination by nonlinear inversion of amplitudes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 101, 366–378.
- Hardebeck, J.L., Shearer, P.M. (2003). Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bull. seism. Soc. Am.*, 93, 2432–2444.
- Jost, M.L., Herrmann, R.B. (1989). A student's guide and review of moment tensors. *Seism. Res. Lett.*, 60, 37–57.
- Kim, W.-Y. (1987). Modelling short-period crustal phases at regional distances for the seismic source parameter inversion. *Phys. Earth planet. Inter.*, 47, 159–177.
- Koch, K. (1991, a). Moment tensor inversion of local earthquake data—I. Investigation of the method and its numerical stability with model calculations. *Geophys. J. Int.*, 106, 305–319.
- Lay, T., Wallace, T. (1995). Modern Global Seismology. International Geophysics Series 58. San Diego: Academic Press.
- Mai M., Schorlemmer D., Page M. et al. (2016). The Earthquake-Source Inversion Validation (SIV) Project. *Seism. Res. Lett.*, 87, 690–708. doi: 10.1785/0220150231.
- Malytskyy, D. (2016). Mathematical modeling in the problems of seismology. Kyiv: Naukova Dumka. [in Ukrainian]
- Malytskyy D. (2010). Analytic-numerical approaches to the calculation of seismic moment tensor as a function of time. *Geoinformatika*, 1, 79–85. [in Ukrainian]
- Malytskyy, D., Kozlovskyy, E. (2014). Seismic waves in layered media, *J. of Earth Science and Engineering*, 4, 311–325.
- Malytskyy, D., D'Amico, S. (2015). Moment tensor solutions through waveforms inversion. ISBN: 978-88-98161-13-3. Mistral Service S.a.S., Earth and Environmental Sciences.
- Mao, W.J., Panza, G.F., Sulhadolc, P. (1994). Linearized waveform inversion of local and near-regional events for source mechanism and rupturing processes. *Geophys. J. Int.*, 116, 784–798.
- Nabelek, J.L. (1984). Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves. *PhD thesis*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Nabelek, J., Xia, G. (1995). Moment-tensor analysis using regional data: application to the 25 March, 1993, Scotts Mills, Oregon, earthquake. *J. geophys. Res.*, 100, 13–16.
- Pang, G., Koper, K.D., Stickney, M.C. et al. (2018). Seismicity in the Challis, Idaho, Region, January 2014–May 2017: Late Aftershocks of the 1983 Ms 7.3 Borah Peak Earthquake. *Seism. Res. Lett.*, 89, 1366–1378.
- Saikia, C.K., Herrmann, R.B. (1985). Application of waveform modeling to determine focal mechanisms of four 1982 Miramichi aftershocks. *Bull. seism. Soc. Am.*, 75, 1021–1040.
- Shemeta, J.E. (1989). New analyses of three-component digital data for aftershocks of the 1983 Borah Peak, Idaho, earthquake: Source parameters and refined hypocenters. *M.S. Thesis*. Department of Geology and Geophysics, University of Utah.
- Shomali, Z.H., Slunga, R. (2000). Body wave moment tensor inversion of local earthquakes: an application to the South Iceland seismic zone. *Geophys. J. Int.*, 140, 63–70.
- Sileny, J., Psencik, I. (1995). Mechanisms of local earthquakes in 3D inhomogeneous media determined by waveform inversion. *Geophys. J. Int.*, 121, 459–474.
- Sileny, J., Panza, G.F., Campus, P. (1992). Waveform inversion for point source moment tensor retrieval with variable hypocentral depth and structural model. *Geophys. J. Int.*, 109, 259–274.
- Sileny, J., Campus, P., Panza, G.F. (1996). Seismic moment tensor resolution by waveform inversion of a few local noisy records—I. Synthetic tests. *Geophys. J. Int.*, 126, 605–619.
- Singh, S.K., Ordaz, M., Pacheco, J.F., Courboux, F. (2000). A simple source inversion scheme for displacement seismograms recorded at short distances. *J. Seism.*, 4, 267–284.
- Sipkin, S.A. (1986). Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data, global seismicity 1981–1983. *Bull. seism. Soc. Am.*, 76, 1515–1541.
- Stump, B.W., Johnson, L.R. (1977). The determination of source properties by the linear inversion of seismograms. *Bull. seism. Soc. Am.*, 67, 1489–1501.
- Vavrychuk V., Kuhn D. (2012). Moment tensor inversion of waveforms: a two-step time frequency approach. *Geophys. J. Int.*, 190, 1761–1776.

Weber, Z. (2016). Probabilistic waveform inversion for 22 earthquake moment tensors in Hungary: new constraints on the tectonic stress pattern inside the Pannonian basin. *Geophys. J. Int.*, 204, 236–249.

Weber, Z. (2006). Probabilistic local waveform inversion for moment tensor and hypocentral location. *Geophys. J. Int.*, 165, 607–621.

Zhao, L.-S., Helmberger, D.V. (1994). Source estimation from broadband regional seismograms. *Bull. seism. Soc. Am.*, 84, 91–104.

Zhu, L., Helmberger, D.V. (1996). Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms. *Bull. seism. Soc. Am.*, 86, 1634–1641.

Надійшла до редколегії 28.08.2020

Д. Малицький¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

E-mail: dmalytskyu@gmail.com;

Д. Майкесел^{1,2}, PhD, проф.,

E-mail: DylanMikesell@boisestate.edu;

¹Карпатське відділення Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України,

вул. Наукова, 3, б. м. Львів, 79060, Україна;

²Відділення наук про Землю, Університет м. Бойзе,

1910 Юніверсіті Драйв, Бойзе, Айдахо, 83725 США

ВИЗНАЧЕННЯ ФОКАЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ МАЛИХ ЗЕМЛЕТРУСІВ ШЛЯХОМ ОБЕРНЕННЯ ЇХНІХ ХВИЛЬОВИХ ФОРМ

Представлено метод для визначення тензора сейсмічного моменту з використанням тільки прямих *P*-хвиль, які реєструються на одній і на обмеженій кількості станцій. Метод базується на роботах авторів, у яких розвинута версія матричного методу для обчислення поля переміщень тільки для прямих *P*-хвиль, які поширюються в горизонтально-шаруватому півпросторі від точкового джерела, що представлено тензором сейсмічного моменту. Ми описуємо процедуру визначення фокального механізму малих землетрусів і показуємо її застосування на прикладі двох місцевих землетрусів, які відбулися в регіоні м. Бойзе (США). Визначення тензора сейсмічного моменту шляхом обертання їхніх хвильових форм базується на точковій моделі джерела, а також на методі для визначення синтетичних сейсмограм за допомогою матричного методу для хвиль, які поширюються в пружному, горизонтально-шаруватому середовищі. У роботі показано, що обертання лише прямих *P*-хвиль дозволяє зменшити вплив неточності моделі середовища, оскільки прямі хвилі зазнають набагато меншого спотворення через неточність, аніж відбиті й конвертовані. Цей підхід значно поліпшує точність і надійність методу обертання хвильових форм для визначення фокального механізму. Вогнище землетрусу розглядається як точкове із задалегідь відомим розташуванням і часом виникнення. На основі розв'язку прямої задачі й з використанням т. зв. розв'язку узагальненого обертання розроблено алгоритм обертання спостережуваних хвильових форм з метою визначення компонент сейсмічного тензора $M(t)$.

Ключові слова: тензор сейсмічного моменту, фокальний механізм, малі землетруси, матричний метод.

Д. Малицький¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

E-mail: dmalytskyu@gmail.com;

Д. Майкесел^{1,2}, PhD, проф.,

E-mail: DylanMikesell@boisestate.edu;

¹Карпатское отделение Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,

ул. Научная, 3, б. г. Львов, 79060, Украина;

²Отделение наук о Земле, Университет г. Бойзе,

1910 Юниверсити Драйв, Бойзе, Айдахо, 83725 США

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ МАЛЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПУТЕМ ОБРАЩЕНИЯ ИХ ВОЛНОВЫХ ФОРМ

Представлен метод для определения тензора сейсмического момента с использованием только прямых *P*-волн, регистрируемых на одной и на ограниченном количестве станций. Метод основан на подходе, описанном в работах авторов, в которых развита версия матричного метода для вычисления поля перемещений только для прямых *P*-волн, которые распространяются в горизонтально-слоистом полупространстве от точечного источника, представленного тензором сейсмического момента. Мы описываем процедуру определения фокального механизма малых землетрясений и показываем ее применение на примере двух местных землетрясений, которые произошли в регионе г. Бойзе (США). Определение тензора сейсмического момента путем обращения их волновых форм базируется на точечной модели источника, а также на методе для определения синтетических сейсмограмм с помощью матричного метода для волн, распространяющихся в упругой, горизонтально-слоистой среде. В работе показано, что обращение только прямых *P*-волн позволяет уменьшить влияние неточности модели среды, поскольку прямые волны испытывают гораздо меньшие искажения, чем отраженные и конвертируемые. Этот подход значительно улучшает точность и надежность метода обращения волновых форм для определения фокального механизма. Очаг землетрясения рассматривается как точечный, с известным расположением и времени возникновения. На основе решения прямой задачи и с использованием обобщенного обращения разработан алгоритм обращения наблюдаемых волновых форм с целью определения компонент сейсмического тензора $M(t)$.

Ключевые слова: тензор сейсмического момента, фокальный механизм, малые землетрясения, матричный метод.

Наукове видання



ВІСНИК

КИЇВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОЛОГІЯ

Випуск 1(92)

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. 13,6. Наклад 300. Зам. № 221-9984.
Гарнітура Arial. Папір офсетний. Друк офсетний. Вид. № Гл1.
Підписано до друку 05.01.2021

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.knu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1103 від 31.10.02